



№ 1/2022

В ВЫПУСКЕ:

**ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ
КОРЫ АСТРОБЛЕМЫ
МАНИКУАГАНО ДАННЫМ
СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ
МЕТОДОМ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН**



**НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ
ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ЦИРКОН В
МЕТАСОМАТИЗИРОВАННЫХ
ГАРЦБУРГИТАХ ЭКЛОГИТОВОЙ
АССОЦИАЦИИ САЛМА**



**ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ
КООРДИНАТ: АНАЛИЗ
СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ**

GeoScience
S C I E N T I F I C J O U R N A L



@GEOSCIENCERU

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ / EDITORIAL BOARD

Петр Докукин / Peter Dokukin

главный редактор, кандидат технических наук (Россия) /
Chief Editor, PhD in Geodesy (Russia)

Владимир Владимиров / Vladimir Vladimirov

кандидат геолого-минералогических наук (Россия) / PhD in
Geological and Mineralogical Science (Russia)

Иоаннис Гитас / Ioannis Gitas

PhD, профессор (Греция) / Head of Editorial Council, PhD in GIS
(Greece)

Радим Гарецкий / Radim Garetsky

академик РАН, академик НАН Беларуси, доктор геолого-
минералогических наук, профессор (Республика Беларусь) /
Academician of RAS, Academician of National Academy of Science
of Belarus, Doctor of Geological and Mineralogical Science,
professor (Belarus)

Ксения Докукина / Ksenia Dokukina

кандидат геолого-минералогических наук (Россия) / PhD in
Geological and Mineralogical Science (Russia)

Юрий Ерохин / Yuriy Erokhin

кандидат геолого-минералогических наук (Россия) / PhD in
Geological and Mineralogical Science (Russia)

Эй-Хсинг Жу / A-Xing Zhu

PhD, профессор (США) / PhD, professor (USA)

Михаил Кабан / Mikhail Kaban

доктор физико-математических наук (Германия) / Doctor of
Science (Germany)

Александр Карпик / Aleksandr Karpik

доктор технических наук, профессор (Россия) / Doctor of
Technical Science, professor (Russia)

Владимир Кафтан / Vladimir Kaftan

доктор технических наук (Россия) / Doctor of Technical
Science (Geoinformatics) (Russia)

Сергей Лебедев / Sergey Lebedev

доктор физико-математических наук (Россия) / Doctor of
Science (Russia)

Юджин Левин / Eugene Levin

PhD, доцент (США) / PhD, Associate Professor, (USA)

Василий Малинников / Vasily Malinnikov

доктор технических наук, профессор (Россия) / Doctor
of Technical Science (Geodesy), professor (Russia)

Анатолий Певнев / Anatoly Pevnev

доктор технических наук, профессор (Россия) / Doctor of
Technical Science, professor (Russia)

Вадим Плющиков / Vadim Plyushikov

доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия) /
Doctor of Agriculture Science, professor (Russia)

Александр Прищепов / Alexandr Prishchepov

PhD, доцент (Дания) / PhD, Associate Professor (Denmark)

Игорь Савин / Igor Savin

Академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук,
профессор (Россия) / Academician of RAS, Doctor of Agriculture
Science (Russia)

Виктор Савиных / Victor Savinykh

Академик РАН, доктор технических наук, профессор (Россия)
/ Academician of RAS, Doctor of Technical Science (Geodesy),
professor (Russia)

Сергей Харченко / Sergey Kharchenko

доктор физико-математических наук, профессор (Россия) /
Doctor of Physical and Mathematician Science, Professor (Russia)

РЕДАКЦИЯ / TECHNICAL BOARD

Петр Докукин / Peter Dokukin**Антон Поддубский / Anton Poddubsky****Гаик Атамчьян / Gaik Atmacyan****Артемий Алексеев / Artemiy Alexeev****Айдын Байрамов / Aydyn Bayramov****Денис Парпура / Denis Parpura**

Свидетельство Роскомнадзора Эл№Фс77-44805 от 29.04.2011

ISSN: 2223-0831

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования

Учредители (издатели): ООО «ГеоДозор», Россия, Москва

Почтовый адрес редакции: Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8 кор. 2

Электронный адрес: <http://geo-science.ru>

Электронная почта: journal@geo-science.ru



@GEOSCIENCERU

Размещение статьи в номере журнала на его официальном интернет-сайте <http://geo-science.ru> является свидетельством публикации.

Авторские права сохраняются в соответствии с международными правилами.

Авторы статей несут ответственность за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция не всегда разделяет мнения авторов и не несет ответственности за недостоверность публикуемых данных. Редакция журнала не несет никакой ответственности перед авторами и/или третьими лицами и организациями за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Редакция вправе изъять уже опубликованную статью, если выяснится, что в процессе публикации статьи были нарушены чьи-либо права или общепринятые нормы научной этики. О факте изъятия статьи редакция сообщает автору, который представил статью, рецензенту и организации, где работа выполнялась.

Правила предоставления статей и требования к их оформлению размещены на официальном сайте журнала по адресу <http://geo-science.ru>

ОТ РЕДАКЦИИ	
Памяти Михаила Вениаминовича Минца (1939-2021)	004
ГЕОЛОГИЯ / GEOLOGY	
Минц М.В., Глазнев В.Н., Докукина К.А., Муравина О.М., Афонина Т.Б. Трехмерная модель земной коры астроблемы Маникуаган по данным сейсмопрофлирования методом отраженных волн, Провинция Гренвилл, Lithoprobe Ag Line 55 / Mints M.V., Glaznev V.N., Dokukina K.A., Muravina O.M., Afonina T.B. A Reflection Seismic-Based 3d Crustal-Scale Model of the Manicouagan Impact Structure, Grenville Province, Lithoprobe Ag Line 55	005
Асланов Б.С., Худузаде А.И., Асланзаде Ф.Б. Глубинная и дезъюнктивная тектоника мезозойских отложений Евлах-Агджебединского нефтегазоносного района по геофизическим данным (Азербайджан) / Aslanov B.S., Khuduzadeh A.I., Aslanzade F.B. Depth and Disjunctive Tectonics of the Mesozoic Sediments of the Evlakh-Agdzhebedi Oil and Gas-Bearing Area According to Geophysical Data (Azerbaijan)	032
Докукина К.А., Окина О.И., Шешуков В.С., Баянова Т.Б., Серов П.А., Пожиленко В.И. Неопротерозойский гидротермальный циркон в метасоматизированных гарцбургитах эклогитовой ассоциации Салма, Беломорская эклогитовая провинция / Dokukina K.A., Okina O.I., Sheshukov V.S., Bayanova T.B., Serov P.A., Pozhilenko V.I. Neoproterozoic Hydrothermal Zircon in Metasomatized Harzburgites of the Salma Eclogite Association, Belomorian Eclogite Province	040
ГЕОДЕЗИЯ / GEODESY	
Кафтан В.И., Побединский Г.Г., Савиных В.П., Столяров И.А. Государственные системы координат: анализ состояния и перспектив / Kaftan V.I., Pobedinsky G.G., Savinykh V.P., Stoliarov I.A. State Coordinate Systems: Analysis of the State and Prospects	051
Щенова Д.С., Мельников А.Ю. Изучение возможности применения метода Precise Point Positioning для геодезического обеспечения кадастровых работ на залесенной местности / Shenova D.S., Melnikov A.Yu. Study of the Possibility of Application of the Precise Point Positioning Method for Geodetic Support of Cadastral Works in Forested Areas	063
ПРОБЛЕМЫ, ПОИСКИ, РЕШЕНИЯ / PROBLEMS, SEARCH, SOLUTIONS	
Бровар Б.В., Кафтан В.И., Нейман Ю.М. Проблемы науки и образования в геодезии / Brovar B.V., Kaftan V.I., Neyman Yu.M. Geodesy: Problems of Science and Education	073



ПАМЯТИ МИХАИЛА ВЕНИАМИНОВИЧА МИНЦА (1939 - 2021)

22 октября 2021 г. на 83 году жизни скончался Михаил Вениаминович Минц, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Геологического института РАН. Это был выдающийся ученый с мировым именем, генератор идей и признанный лидер в области глобальной тектоники и геодинамики.

Выпускник Геологического факультета МГУ 1961 г., в 1961-1985 гг. он работал в экспедициях, возглавлял геологические партии по составлению геологических и тектонических карт в Центральном Казахстане, на Алданском щите, в Северо-Восточной Азии, на Кольском полуострове. В 1966-1974 гг. исследовал Охотско-Чукотский вулканический пояс. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1974 г. исследовал Кольский полуостров (уточнение геологических карт масштаба 1:200 000, региональные геолого-геофизические исследования района Кольской сверхглубокой скважины, особенно для целей интерпретации данных сверхглубокого бурения). В 1985-1995 гг. работал в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, по интерпретации геолого-тектонической эволюции Кольского полуострова и прилегающих территорий в раннем докембрии. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию «Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: (Геология, палеогеодинамика и эволюция континентальной коры)». В 1994-1996 гг. читал лекции на кафедре петрологии МГУ. С 1995 г. работал в ГИН РАН, был заведующим Лабораторией тектоники раннего докембрия.

Михаил Вениаминович был очень общительным, добрым и порядочным человеком. Он до последнего дня продолжал плодотворно трудиться и его неожиданный уход стал большой потерей для всех нас.

Несколько лет назад М.В.Минц оказал нашему журналу большую честь и дал согласие войти в состав его редколлегии. И около месяца до ухода прислал свою последнюю статью, которую мы публикуем в память о Михаиле Вениаминовиче.

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ АСТРОБЛЕМЫ МАНИКУАГАН ПО ДАННЫМ СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН, ПРОВИНЦИЯ ГРЕНВИЛЛ, LITHOPROBE AG LINE 55

Минц М.В. ¹Глазнев В.Н. ²Докукина К.А. ¹Муравина О.М. ²Афоница Т.Б. ¹¹ Геологический институт ГИН РАН, Москва, Россия² Воронежский Государственный университет, Воронеж, РоссияE-mail: dokukina@mail.ru

Аннотация: АстроBLEMA Маникуаган – одна из крупнейших в докембрийских породах Земли. Представленная в статье 3D модель интегрирует региональные геолого-геофизические данные и геологическую интерпретацию сейсмического образа коры и коро-мантийной границы по профилю AG-55 программы LITHOPROBE и демонстрирует главные особенности глубинного строения астроBLEMЫ. Метеоритный кратер обрамлен валообразными овальными в плане антиформами, которые чередуются с овальными и дугообразными синформами. Максимальный внешний радиус системы концентрических зон ~300 км указывает на принадлежность астроBLEMЫ Маникуаган типу многокольцевых бассейнов, известных на Луне, Марсе и Меркурии. Асимметрия концентрических зон указывает на наклонную траекторию метеорита, перемещавшегося в северо-западном направлении. Идеализированный разрез литосферы, включающей астроBLEMУ Маникуаган, включает четыре «слоя», соответствующие главным структурно-тектоническим элементам орогена Гренвилл: аллохтон – параавтохтон – нижняя кора – мантия. Наиболее интенсивному ударному воздействию подверглись аллохтон и параавтохтон. Породы параавтохтона, пластически выжатые в обрамление метеоритного кратера, сформировали концентрические валы (антиформы), тогда как жесткие породы аллохтона сохранились от последующей денудации в синформных впадинах, чередующихся с антиформными структурами. Верхняя пластическая часть нижней коры также подверглась выжиманию, образовав ядра антиформ. Нижняя часть нижнекорового слоя не имеет явных признаков деформации. Глубина кратера в сечении профилем AG-55 ~ 20 км, максимальная глубина кратерной депрессии и процессы в нижней коре и на уровне коро-мантийной границы непосредственно под кратером остались не охарактеризованными. На сейсмическом разрезе средняя и нижняя кора орогена Гренвилл в районе астроBLEMЫ Маникуаган представлены зоной рефлексивити мощностью 25-30 км. Подстилающая нижнюю кору гладкая коро-мантийная граница лишь незначительно нарушена. Подобные образы нижней коры и коро-мантийной границы, которые сопровождают Крупные Магматические Провинции, указывают на внутриконтинентальное происхождение орогена Гренвилл.

Ключевые слова: астроBLEMA Маникуаган, 3D геолого-геофизическая модель, LITHOPROBE, ороген Гренвилл, сейсмические образы коры.

1. Введение

К настоящему времени в континентальных областях Земли известно значительное число импактных структур (метеоритных кратеров), среди которых наиболее крупные: Чиксулуб (Chixulub) в Мексике, 65 млн лет, около 180 км шириной, Садбери (Sudbury) в Канаде, 1.85 млрд лет, диаметр 200 км, и Вредефорт (Vredefort) в Южной Африке, 2.02 млрд лет, диаметр ~250 км. АстроBLEMA Маникуаган (триас, 214 млн лет), расположенная на Канадском щите в пределах провинции Гренвилл (51°23'N, 68°42'W), обозначена кольцевым рвом диаметром 65 км, который отчетливо демонстрируется космическими изображениями

Земли (рис. 1а). Эта астроBLEMA – одна из крупнейших, среди размещенных в докембрийских кристаллических породах. Согласно существующим оценкам, она занимает четвертое место среди известных на континентах импактных кратеров [Earth Impact Database, 2009; Phinney et al., 1978; Grieve, Head, 1983; O'Dale, 2013]. Исследование астроBLEM должно предоставить данные, имеющие решающее значение для понимания катастрофических импактных процессов и их воздействия на Землю.

Первоначальные геологические исследования структуры Маникуаган, были выполнены Rose [1955] и Bérard [1962]. Уже на первоначальной стадии, исследователи отмечали, что округлые

очертания области Маникуаган можно объяснить формированием этой структуры в результате падения метеорита. Некоторые свидетельства, такие как нарушенный характер осадочных отложений вдоль внутренних берегов озер, подтверждали эту теорию. Однако, согласно Kish [1968], анортозитовые породы трудно объяснить «центральной поднятием» докембрийского фундамента, потому что они отличаются по составу от других анортозитовых пород в районе Маникуаган. Детальное исследование геологии и петрологии горных пород, которое стало обоснованием представления структур Маникуаган в качестве «резургентной кальдеры», было опубликовано Currie [1972]: по мнению этого исследователя, подавляющее большинство доказательств свидетельствует в пользу эндогенного происхождения кальдеры. Тем не менее, Currie [1972] отмечает, что даже в отсутствие высокобарных минералов, таких как коэсит и стишовит, наличие определенных свидетельств шокового метаморфизма оставляет сомнения в адекватности эндогенной модели.

В современном виде обрамляющий астроблему кольцевой ров возник в результате слияния двух дугообразных озер, объединенных в водохранилище Маникуаган (рис. 1а). Речная система аналогичной геометрии к северу от водохранилища указывает на вероятность существования сопутствующего кратера-близнеца (Лелукуау террейн). Водоохранилище обрамляет расчлененное плато, сложенное метаморфическими породами и расплавленными импактитами мощностью около 200 м, и включающее серию приподнятых пиков. Состав расплавленных пород, близкий кварцевому монцодиориту [Spray, Thompson, 2008], указывает на их формирование в результате плавления свойственной региону ассоциации докембрийских пород. Какие-либо фрагменты метеорита среди расплавленных пород обнаружены не были

[Grieve, Floran, 1978; Palme et al., 1978]. Фрагментированные породы, окружающие центральный пик, были денудированы оледенением и эрозией. Кольцевой ров – это то, что осталось после удаления вмещающих пород, испытавших «максимальную» трещиноватость; ров интерпретируется как переуглубленная ледником зона внутреннего контакта между дном кратера и блоками первоначального обрамления.

Предполагается, что диаметр исходного кратера приблизительно в три раза превышал диаметр кольцевого рва. В строении астроблемы, основываясь на топографии и особенностях геологической структуры, принято выделять шесть морфологических элементов [Floran, Dence, 1976; Orphal, Schultz, 1978].

1. Центральное поднятие диаметром 25 км, сложенное выведенными с глубины породами, неравномерно подвергшимися шоковому метаморфизму, которые вмещают пластинообразные тела расплавленных импактитов, жилы псевдотахилитов и анортозиты.
2. Внутреннее плато диаметром 55 км, ограниченное кольцевым рвом, образовано расплавленными импактитами, которые подстилаются породами основания, подвергшимися деформациям и шоковому метаморфизму.
3. Кольцевой ров диаметром 65 км, вмещающий блоки интенсивно деформированных ордовикских известняков.
4. Внутренняя зона трещиноватости диаметром ~100 км, дренаж в сторону кольцевого рва.
5. Внешняя зона нарушений диаметром ~150 км.
6. Периферическая депрессия диаметром > 150 км.

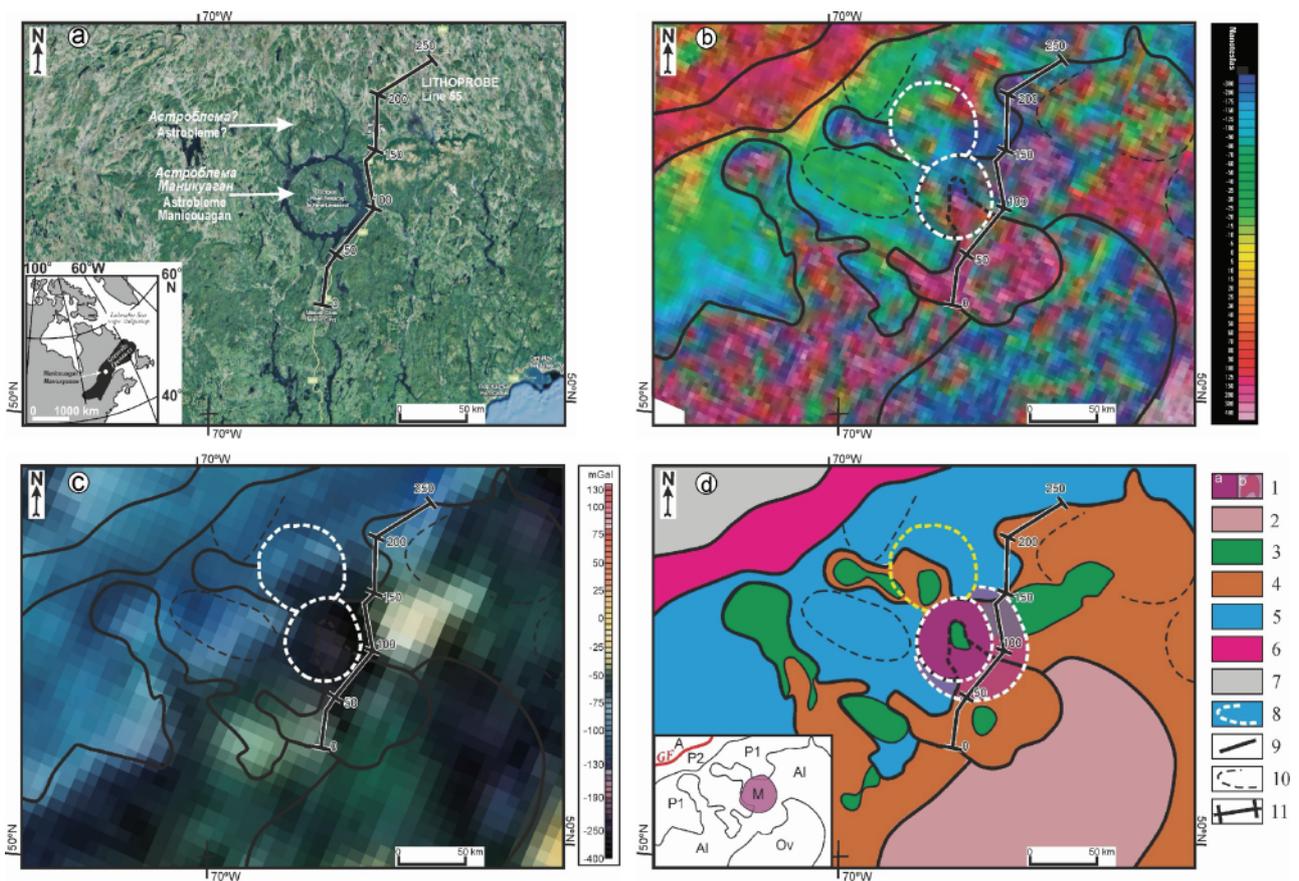


Рис. 1. Импактная структура Маникуаган и ее обрамление: а – фрагмент карты Google, обратите внимание на кольцевую структуру речной сети к северу от водохранилища Маникуаган, которая похожа на кольцевую структуру водохранилища; на врезке: расположение кратера Маникуаган ; б – геологические границы на основе карты аномального магнитного поля [The Magnetic anomaly map of North America, 2002], показаны кратер Маникуаган и предполагаемый кратер к северу от Маникуаган; с – геологические границы, выделенные на карте магнитных аномалий, в сочетании с картой гравитационного поля Северной Америки [The Gravity Anomaly map of North America, 1989]; д – геологическая карта импактной структуры Маникуаган и ее обрамления, на врезке: основные тектонические единицы: А – кратон Сьюпириор, автохтон; ороген Гренвилл: P1 – параавтохтон-1, P2 – параавтохтон-2, Al – аллохтон, Ov – овоид (см. пояснение в тексте), М – кратер Маникуаган; GF - Гренвиллский фронт.

1 – кратер Маникуаган: а – внутри кольцевого рва, б – отрисованный по данным сейсмоки отраженных волн; 2 – овоид, гнейсы различной намагниченности; 3 – тела габбро-анортозитов и анортозитов; 4 – аллохтон, различные гнейсы; 5 – параавтохтон-1, низкомагнитные гнейсы; 6 – параавтохтон-2, высокомагнитные граниты, 7 – кратон Сьюпириор, гранит-зеленокаменный комплекс; 8 – границы ударных кратеров; 9 – тектонические границы; 10 – тренды магнитных аномалий; 10 – сейсмический профиль AG-55.

Fig. 1. The Manicouagan impact structure and surrounding area: a – fragment of the google map: note the ring pattern of the river network north of the reservoir, map-inset: location of the Manicouagan crater; b – geological boundaries based on the Magnetic anomaly map of North America [2002], the Manicouagan crater and the suggested crater north of Manicouagan are shown; c – geological boundaries deciphered on the Magnetic anomaly map shown in combination with the Gravity Anomaly map of North America [1989]; d – geological map of the Manicouagan impact structure and surrounding area, map-inset: main tectonic units, A - Superior craton: autochthon; Grenville orogen: P1 – paraautochthon-1, P2 – paraautochthon-2, Al – allochthon, Ov - ovoid (see explanation in text), M – Manicouagan crater; GF – Grenville Front.

1 – Manicouagan crater: a – within annular moat, b – drawn in accordance with reflection seismic data; 2 – ovoid, gneisses with various magnetization; 3 – gabbro-anorthosite and anorthosite bodies, 4 – allochthon, various gneisses; 5 – paraautochthon-1, low-magnetic gneisses; 6 – paraautochthon-2, high-magnetic granites, 7 – Superior craton, granite-greenstone complex; 8 – boundaries of the impact craters; 9 – tectonic boundaries; 10 – trends of the magnetic anomalies; 10 – reflection seismic profile AG-55.

По оценке [Spray et al., 2010], нижняя граница расплавных импактитов располагается сегодня на глубине 2-3 км. Модель Simonds et al. [1978] предполагает, что в точке удара породы мгновенно испарились / расплавились / раскололись под действием высвободившейся энергии, оставив слой импактного расплава объемом 200-600 кубических километров непосредственно на породах фундамента. Сила удара эксгумировала и превратила породы мишени в жидкость на глубину до 9 км. Первоначальный кратер стал плавильным котлом для относительно молодых горных пород на поверхности и для большей части пород докембрийского фундамента. Прошло от 1600 до 5000 лет, прежде чем расплавленные породы остыли.

Существенный прирост информации о строении кратера был получен в период с 1994 по 2006 год благодаря использованию ~18 км керна из 38 скважин, пробуренных при разведке полезных ископаемых. Три скважины достигли глубины более 1.5 км, одна 1.8 км. Сохранность почти полного набора импактитов позволила обратиться к модели большого сложного кратера [Spray et al., 2010]. В центральном поднятии преобладают анортозитовые породы, похожие на компоненты Лунных Гор. В результате эрозии были удалены только аллогенная брекчия и самая верхняя часть пласта расплавных импактитов расплава. Нижняя часть этого пласта включает фрагменты нерасплавленных пород. Пласт расплавных импактитов, перекрывающий неровное основание, при средней мощности 300-400 м включает участки мощностью до 1400 м, в пределах которых расплав подвергся дифференциации [Spray, Thompson, 2008]. Центральное поднятие Маникуаган диаметром около 23 км, характеризующееся изрезанным рельефом, представляет собой ограниченный разломами горст, который образован анортозитом, подвергшимся ударному воздействию [Spray et al., 2010]. Согласно [Biren,

Spray, 2010], поднятие возвышается более чем на 300 м над уровнем расплавных пород. В его строении преобладают анортозитовые породы с вызванными импактом дискретной деформацией и тонкими жилками импактного расплава, кристаллизовавшимися при ~1350°C. Следуя принятой в [Biren, Spray, 2010] оценке диаметра астроблемы Маникуаган (90 км), величина структурного подъема (SU) может быть оценена в ~ 9 км. На Луне, Марсе и других планетных телах развито множество превосходных сопоставимых примеров центральных пиков кольцевых кратеров. Механизм формирования центрального поднятия остается предметом дискуссий.

Подводя итог краткой характеристике результатов изучения структуры Маникуаган, следует отметить: (1) по мере расширения базы данных, конкуренция моделей эндогенного и импактного происхождения этой структуры, завершилась признанием импактной модели; (2) эти исследования практически не затрагивали соотношения особенностей астроблемы с геологическим строением региона (мезо-неопротерозойского орогена Гренвилл); (3) данные о глубинном строении астроблемы и глубине проникновения вызванных импактом деформаций ограничены геологическими наблюдениями на уровне рельефа и в малоглубинных скважинах.

Принципиально новым шагом в познании астроблемы Маникуаган могли стать исследования в рамках программы LITHOPROBE: в 1993 г. вдоль шоссе Québec-389 в непосредственной близости от кольцевого рва (водохранилища Маникуаган) было выполнены сейсмические исследования методом отраженных волн вдоль профиля AG-55. Согласно существующим оценкам (e.g., [Grieve, Head, 1983; Therriault et al., 1997; Spray et al., 2010]), вызванная импактом деформация пород в районе сейсмопрофиля ограничивается по глубине первыми километрами. Избыточное доверие к этим оценкам (на наш взгляд, не имеющим

необходимой достоверности) стало причиной ограничения задач исследования по профилю AG-55 проблемами докембрийской геологии; импактное воздействие на строение земной коры в районе астроблемы осталось за рамками этого исследования [Eaton et al., 1995; Eaton, Hynes, 2000; Hynes et al., 2000].

Цель нашего исследования состояла в разработке 3D модели строения и эволюции коры в районе астроблемы Маникуаган, базирующейся на интегральном анализе трех типов данных: (1) региональной геологии и геофизики, (2) особенностей геологического строения астроблемы и (3) сейсмических образцов коры и коро-мантийной границы.

2. Региональная геология (Regional geology and major events in the evolution)

Принято считать, что Гренвиллский ороген на востоке Канадского щита (рис. 1а) образован сочетанием террейнов, различающихся историей формирования и объединенных в единую тектоническую структуру под воздействием коллизионной тектоники и мощных импульсов термальной и магматической активности, охвативших обширную территорию в позднем мезопротерозое и в неопротерозое от ~ 1.19 до 0.96 млрд лет [Wardle et al., 1986; Cosca et al., 1998; Davidson, 1998; Tollo et al., 2004; Rivers, 2009, 2015; Andersson et al., 2008; Hammer et al., 2010; Rivers et al., 2012, также ссылки в этих работах]. Северо-западная граница орогена взбросо-надвигового типа известна как Гренвиллский фронт. Юго-восточная граница образована фронтальными надвигами палеозойского Аппалачского орогена. Сформированные при коллизии тектонические покровы Гренвиллского сектора сгруппированы в тектонические пояса [Culotta et al., 1990; Rivers et al. 1989, 2012; Ludden, Hynes, 2000; Martignole et al., 2000; Rivers, 2009, 2015; Hynes, Rivers, 2010]. Гренвиллский фронт отделяет породы нижнего по структурному положению

Параавтохтонного пояса от архей-палеопротерозойского автохтона. Пограничный надвиг образует основание верхнего по структурному положению Аллохтонного пояса. В сравнении с Гренвиллским фронтом Пограничный надвиг аллохтона отличается многократно большим масштабом тектонического транспорта и разделяет области со значительно различающимися структурными особенностями, возрастом и характером метаморфизма, что позволяет рассматривать его в качестве главной сдвига-надвиговой границы орогена.

Выдающейся характеристикой Гренвиллского орогена является широкое проявление специфического интрузивного магматизма: многочисленные тела «автономных» анортозитов, габбро-анортозитов, чарнокитов и калиевых гранитоидов (в том числе рапакиви-гранитов) образуют анортозит-мангерит-чарнокит-гранитоидные (АМЧГ) и анортозит-рапакиви-гранитные (АРГ) плутоны. Закономерное пространственное распределение АМЧГ и АРГ плутонов в пределах и в обрамлении Гренвилл-Свеконорвежского орогена (ГСНО), который в мезо-неопротерозое объединял Гренвиллский и Свеконорвежский орогены, свидетельствует о принадлежности континентов Лаврентия и Балтика единому суперконтиненту Лавроскандия на протяжении, по меньшей мере, от ~1.9 до ~0.9 млрд лет [Mints, 2017]. Интрузивные породы АМЧГ и АРГ плутонов, которые занимают более 20% современной дневной поверхности Гренвиллского орогена, принадлежат мезо-неопротерозойской Крупной Магматической Провинции (КМП) (Large Igneous Province (LIP)) Лавроскандии. За пределами ГСНО, эти плутоны распространены на обширной территории, сложенной архейскими и палеопротерозойскими породами; импульсы магматизма в интервале от ~1.9 до 1.33 млрд лет последовательно омолаживаются с востока на запад. В пределах ГСНО, АМЧГ и АРГ плутоны интродуцируют поздне-

палеопротерозойские, мезо- и неопротерозойские породы; последовательные импульсы заключены в интервале от 1.64 до 0.98-0.92 млрд лет [Mints, 2017]. Вслед за внедрением все массивы в той или иной степени подверглись гранулитовому метаморфизму при температурах порядка 800-900°C [Boggs, Corriveau, 2004; Korhonen, 2006; Ulmius et al., 2015].

3. Геологическая интерпретация региональных геофизических полей и сейсмических изображений

Астролема Маникуаган ярко выделяется на космических изображениях благодаря кольцевому рву, заполненному водой одноименного водохранилища. Геофизический образ импактной структуры казался невыразительным [Sweeney, 1978].

Аномальное магнитное поле

Карта аномального магнитного поля в масштабе 1:10 000 000 [Magnetic Anomaly Map ..., 2002] демонстрирует широкие вариации значений магнитных аномалий и, соответственно, состава пород на дневной поверхности или на относительно небольшой глубине. В сравнении с геологической картой Северной Америки масштаба 1:5000 000 [Reed et al., 2005], равно как и в сравнении с известными тектоническими схемами [Rivers et al., 2012; Rivers, 2015] (рис. 1b) карта аномального магнитного поля демонстрирует более детальную структурную характеристику региона и большее разнообразие составов горных пород.

1. Отчетливо выражена северо-северо-западная граница орогена: Гренвиллский фронт срезает структурные направления архейских и палеопротерозойских тектонических подразделений его северного обрамления.

2. Распределение и уровень аномальных значений магнитного поля Параавтохтонного пояса, сопредельного Гренвиллскому фронту, фиксируют два домена (рис. 1b, 1d).

(P1) Преобладающая по ширине и протяженности часть Параавтохтонного пояса, сложенная позднеархейскими и, частично, палеопротерозойскими пара- и ортогнейсами, характеризуется резко пониженной напряженностью магнитного поля ниже -80 нТл.

(P2) Непосредственно в зоне Гренвиллского фронта размещены линзы неархейских тоналито-гнейсов и парагнейсов, аналогичных породам в сопредельной автохтонной области кратона Сьюпириор. Этим породам соответствуют повышенные значения напряженности магнитного поля (до 100 нТл).

Особенности магнитного поля над Параавтохтонным поясом можно объяснить сменой магнетита железосодержащими силикатами в условиях метаморфической зональности от зеленосланцевой до амфиболитовой фации [Villeneuve et al., 1993; Eaton, Hynes, 2000]. С другой стороны, учитывая строгую региональную приуроченность низкого магнитного поля к Параавтохтонному поясу вне зависимости от состава горных пород, более вероятной причиной являются закономерные изменения остаточной намагниченности пород в температурной области вблизи точки Кюри, связанные с восходящими и нисходящими тектоническими перемещениями. Точка Кюри для пород кислого состава равна приблизительно 600-700°C [e.g., Kletetschka, Stout, 1998; Dunlop et al., 2010]. При метаморфизме высокой амфиболитовой и гранулитовой фации, характерных для орогена Гренвилл, практически все породы проходят через точку Кюри, однако в преобладающем числе случаев вновь намагничиваются при постепенном охлаждении. В истории Гренвиллского орогена установлены последовательные проявления надвигообразования в обстановке тектонического сжатия и последующего растяжения, как предполагается, фиксирующего коллапс орогена [Rivers, 2015]. Вызванное растяжением быстрое перемещение пород в область низких температур могло

обеспечить консервацию низкого уровня намагниченности горных пород. Более сложная конструкция, основанная на предположении о реакции гидратации в коллизионной обстановке магнетитсодержащего троктолита рутил-содержащим плагиоклаз-амфибол гранатовым гнейсом [Toft et al., 1993], явно не соответствует масштабу явления и вариациям состава гнейсов Параавтохтонного пояса. Высокие значения магнитного поля над породами в зоне Гренвиллского фронта свидетельствует о сохранности ранее приобретенной породами намагниченности и, соответственно, о менее значительном погружении при формировании покровно-надвигового ансамбля. Предлагаемая интерпретация особенностей магнитного поля над Параавтохтонным поясом согласуется с барическими характеристиками метаморфизма горных пород (этап Риголет, 1.01-0.98 млрд лет [Rivers, 1997; Rivers et al., 2002]): низкими значениями давления в зоне Гренвиллского фронта, средними и повышенными значениями в преобладающей части пояса по мере приближения в Пограничному надвигу Аллохтона.

3. Распределение магнитных аномалий в пределах обширной внутренней области орогена, которую принято рассматривать в качестве Аллохтонного пояса, демонстрирует структурный рисунок, который принципиально отличается от известных тектонических схем [e.g., Hynes, Rivers, 2010; Rivers et al., 2012]. Области магнитного поля, выделяющиеся приблизительно однородными значениями (положительными, отрицательными или мозаично чередующимися), как правило, имеют овальные очертания. Локальные положительные и отрицательные аномалии обычно имеют дугообразную или полуовальную форму. Изображение тектонической структуры, прорисованное аномальным магнитным полем, фиксирует ряд овальных ареалов диаметром от 300 до 600 км, следующих друг за другом практически

без промежутков от юго-западного до северо-восточного края орогена Гренвилл (фрагмент овоида Лек Жермен (Lac Germain) на рис. 1b). По аналогии со строением гранулитогнейсового комплекса Волго-Уральского кратона на востоке Русской платформы [Минц и др., 2010; Mints et al., 2015], мы называем эти тектонические структуры «овоидами». Над габброидными телами напряженность магнитного поля достигает 200 нТл.

4. Какие-либо особенности магнитного поля, которые могли быть связаны с импактным воздействием на породы, карта аномального магнитного поля не обнаруживает. Исследователи, занимавшиеся детальным изучением астроблемы, обращали специальное внимание на положительную магнитную аномалию, которая согласуется с габбро-анортозитовым составом центрального поднятия. Предполагалось, что причиной аномалии могла быть намагниченность, вызванная импактом [Coles, Clark, 1978; Orphal, Schultz, 1978; Scott et al., 1996]. Тем не менее, данные по более обширной территории однозначно свидетельствуют о том, что аналогичные положительные аномалии характерны для многочисленных тел габбро-анортозитов на сопредельной территории (рис. 1b, 1d).

Аномальное гравитационное поле

Аномальное гравитационное поле [Gravity anomaly map ..., 1987; Hanna et al., 1989] отличается от аномального магнитного поля значительно более низкой разрешающей способностью и отсутствием четко очерченных локальных аномалий. Информативность карты гравитационного поля возрастает при совмещении этой карты с трендами магнитных аномалий и границами областей, отличающихся характеристиками магнитного поля. Региональные особенности гравитационного поля следуют главным тектоническим структурам, которые различаются уровнем аномального магнитного поля: восточной части

архейского кратона Сьюпириор соответствуют низкий уровень поля, от -100 до -50 мГал; над Гренвиллским орогеном поле характеризуется чередованием пологих и овалных областей также с расплывчатыми границами и контрастными значениями около -80, -25 и -50 мГал. Отчетливая зависимость уровня гравитационного поля от геологического строения региона на уровне рельефа, свидетельствует о решающем вкладе горных пород различной плотности, расположенных на поверхности или на небольшой глубине, в размещении и морфологии гравитационных аномалий (см. также в [Hynes et al., 2000]).

Гренвиллский фронт, как правило, не имеет четкого выражения (рис. 1с, 1d). Параавтохтонному поясу отвечает зона низких значений гравитационного поля от -100 до -50 мГал, которая непосредственно продолжает поле, характерное для кратона Сьюпириор. Эта особенность свидетельствует, что низкоплотные породы верхней и средней коры кратона Сьюпириор подстилают Паравтохтонный пояс. Выклинивание на глубине пород кратона Сьюпириор и Паравтохтонного пояса зафиксировано почти прямолинейной градиентной зоной северо-восточного простираения, к юго-востоку от которой гравитационное поле над Аллохтонным поясом характеризуется чередованием положительных и отрицательных аномалий, соответственно, от 0 до -30 мГал и от -100 до -75 мГал, преобладают значения поля -50 мГал. Положительные аномалии преимущественно связаны с телами габбро и габбро-анортозитов.

АстроBLEMA Маникуаган в региональном поле силы тяжести [Gravity anomaly map ..., 1987] проявлена слабо (рис. 1с), его гравитационная специфика в значительной степени экранирована окружающими аномалиями. С внутренним плато, ограниченным кольцевым рвом, связано локальное понижение поля силы тяжести относительно сопредельной части Аллохтонного пояса на

30-35 мГал. Более детальная карта, приведенная в [Eaton, Hynes, 2000], фиксирует снижение на ~20 мГал. Особенности гравитационного поля не коррелируются с вариациями магнитного поля над внутренним плато и, более вероятно, они не связаны с размещением низкоплотного объекта близ поверхности рельефа. Следует отметить, что в исследованиях [Eaton, Hynes, 2000; Hynes et al., 2000], одной из главных целей которых было моделирование 3D геометрии и структурных отношений между основными литологическими комплексами, опирающееся на интерпретацию гравитационного поля (three-dimensional (3D) geometry and structural relationships among the major lithological units), астроBLEMA оказалась за рамками исследования.

Геологическая интерпретация сейсмических образов (картин сейсмических отражений) коры и коро-мантийной границы по профилю LITHOPROBE AG-55

Методология геологической интерпретации сейсмических образов (картин сейсмических отражений) раннедокембрийской коры и коро-мантийной границы и построения трехмерных моделей глубинного строения была сформирована в процессе глубинного изучения Восточно-Европейского кратона. Ключевые моменты методологии [Mints et al., 2015; Glaznev et al., 2015] заключаются в следующем.

1. Разработка 3D моделей (блок-схем) земной коры региональных тектонических подразделений является наиболее эффективным способом детального согласования геологических карт и интерпретационных геологических разрезов вдоль сейсмических профилей. Благодаря тесной корреляции между сейсмо-геологическими особенностями глубинных уровней земной коры и латеральными вариациями сейсмического образа коро-мантийной границы с геологическими картами, 3D-модели представляют собой

принципиально новую основу для реконструкции глубинного строения, геодинамики и геологической эволюции кратонов.

2. Термины «коро-мантийная граница» и «раздел Мохо» обычно рассматриваются как синонимы. Однако эти термины синонимами не являются. Раздел Мохо – это геофизический образ непрерывной плавно изгибающейся поверхности планетарного ранга, при пересечении которой скорость продольных волн более или менее скачкообразно возрастает с 6.9-7.4 до 8.0-8.2 км/сек [Christensen, Mooney, 1995]. В свою очередь, коро-мантийная граница – это комплексный геологический феномен, совмещающий сведения о составе, уровне метаморфизма и механических свойствах горных пород земной коры, мантии и переходной зоны, а также структурные особенности коро-мантийного раздела. Сейсмогеологические модели коро-мантийной границы, основанные на картинах сейсмических отражений, демонстрируют геолого-структурные характеристики, возникшие в процессе формирования и трансформации этой границы.

3. При геологической интерпретации сейсмических образов коры особое значение имеет непосредственное прослеживание геологических границ и зон разломов, выделенных на картине сейсмических отражений, в направлении современной поверхности и их корреляции с геолого-тектоническими единицами на геологической карте и, равным образом, прослеживание геологических границ и зон разломов, показанных на геологических картах, на глубину, следуя трендам сейсмических отражений.

4. Сейсмические образы коры докембрийских кратонов демонстрируют широкие вариации структурных характеристик коры и определяющую роль наклонных поверхностей раздела. Коро-мантийная граница, как правило, проявлена достаточно отчетливо по смене умеренно или интенсивно отражающей

нижней коры акустически прозрачной мантийной областью. В некоторых случаях нижняя кора акустически полупрозрачна, при этом коро-мантийная граница как бы исчезает, хотя раздел Мохо (по данным преломленных волн) по-прежнему вполне отчетлив. Известны случаи, когда полупрозрачная кора постепенно сменяется акустически прозрачной мантийной областью [BABEL Working Group, 1990; Abramovitz et al., 1997; White et al., 2000; Van der Velden and Cook, 2005; Kukkonen, Lahtinen, 2006; Mints et al., 2009; Минц и др., 2010; Cook et al., 2010; Hammer et al., 2010; Минц, 2011, 2016; Mints et al., 2015]. Нижняя кора на картинах сейсмических отражений обычно отождествляется с зоной многократных субгоризонтальных интенсивных отражений («зоной рефлексивити»), которая во многих случаях, хотя далеко не повсеместно, непосредственно перекрывает коро-мантийную границу [Mooney, Meissner, 1992]. Наиболее популярна в качестве геологического образа зоны рефлексивити модель «расслоенной нижней коры», которая формируется в условиях растяжения, сопровождаемого послойными интрузиями мафитовых мантийных магм [Holliger, Levander, 1994], с контрастами акустической жесткости на границах мафитовых интрузивов и пород коры. Геодинамическая природа и тектоническая значимость нижней коры, охарактеризованной зоной рефлексивити, были исследованы в ходе глубоких исследований Восточно-Европейского кратона. Было показано, что нижней корой, которая образована мафитовыми гранулитами и пронизана послойными интрузивами габброидного и габбро-анортозитового состава (нижнекоревой зоной рефлексивити, зоной интенсивных субпараллельных сейсмических отражений) постилаются регионы, которые рассматриваются в качестве КМП (LIP) [Минц и др., 2010; Mints, 2015; Mints et al., 2015; Glaznev et al., 2015].

Профиль AG-55 [Eaton et al., 1995; Eaton, Hynes, 2000; Hynes et al., 2000] пересекает ороген Гренвилл вдоль шоссе Québec-389 под острым углом к фронтальному надвику. Он пересекает астроблема Маникуаган по хорде, которая незначительно удалена от центра астроблемы и проходит за пределами, но в непосредственной близости от кольцевого рва (рис. 1). Преобладающая часть сейсмического образа коры заполнена яркими отражениями (рис. 2). Геологическая интерпретация сейсмического образа (рис. 2a) включала: выделение наиболее отчетливых структурных трендов и границ структурно однородных доменов (рис. 2b) и интеграцию геологических границ на карте с главными трендами, пересечениями и разрывами корреляции сейсмических отражений (рис. 2c, 2d).

Сейсмический образ по линии AG-55 демонстрирует два уровня коры, различающиеся структурными особенностями: (1) верхний уровень от поверхности до глубины 25-30 км с крупными складками и разрывами, (2) нижний уровень от 25-30 км до коро-мантийной границы, для которого характерны сближенные интенсивные отражения, полого погружающиеся к северо-восточному концу профиля. В местах, где количество отражений несколько меньше, ориентировка отражений сохраняется. Гладкая незначительно нарушенная коро-мантийная граница также полого погружается к северо-востоку в интервале глубин от 40 до 48 км. Эта граница отделяет кору от акустически прозрачной мантии с неравномерно рассеянными короткими отражениями.

В верхней области коры в интервале от 50 до 150 км по профилю, то есть в непосредственном соседстве с кольцевым рвом астроблемы Маникуаган, выделяется коническая синформа, основание которой достигает глубины 20 км. Граница вдоль северного склона синформы подчеркнута серией параллельных отражений. Рисунок коротких

сейсмических отражений около основания синформы напоминает область разгрузки обломочного материала. Размещение и особенности геометрии этих отражений позволяют интерпретировать синформу в качестве сечения профилем краевой части кратера Маникуаган за пределами кольцевого рва.

К юго-западу (25-75 км по профилю) и северо-востоку (150-200 км по профилю) синформу симметрично обрамляют отчетливо прорисованные отражениями антиформные структуры с основаниями на глубине 25-30 км. Сопоставление с геологической картой свидетельствует, что эти антиформы сложены низкомагнитными гнейсами Параавтохтонного пояса. Юго-западный (0-50 км) и северо-восточный склоны (200-250 км) антиформ образуют основания синформных структур, сложенных высокомагнитными гнейсами нижней части разреза Аллохтонного пояса.

В нижней части коры многочисленные интенсивные приблизительно горизонтальные сейсмические отражения заполняют интервал от 24 до 40-48 км глубины, включая средний и нижний уровни коры, образуя необычайно мощную зону рефлексивности, которая без разрывов подстилает архейскую (автохтон) и протерозойскую (параавтохтон и аллохтон) области коры. Верхняя граница зоны рефлексивности срезает складчатый структурный ансамбль верхней коры. Нижняя граница, то есть граница коры и мантии, фиксируется по резкому снижению интенсивности отражений. Породы зоны рефлексивности среднего уровня коры к юго-западу от кратера вовлечены в поднятие, образуя ядро антиформы. На геологическом разрезе рис. 2d условно показан линзообразный фрагмент гранит-зеленокаменной коры кратона Сьюпириор. Его положение в разрезе выбрано предположительно с учетом особенностей структурного рисунка и отмеченных выше особенностей гравитационного поля.

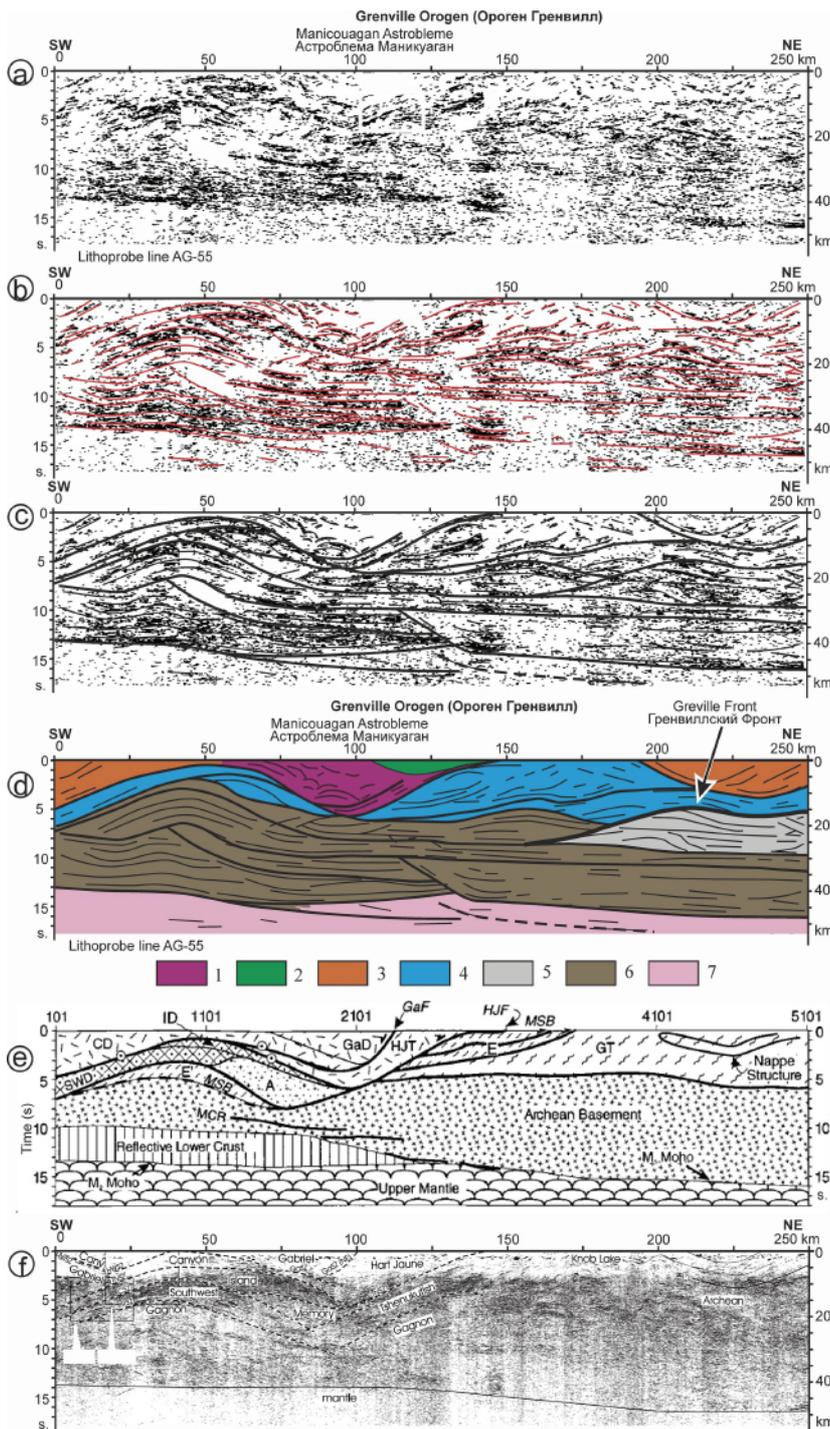


Рис. 2. Земная кора и коро-мантийная граница по профилю AG-55. а – разрез, полученный в результате автоматической корреляции отражений на основе мигрированного сейсмического разреза по [Eaton et al., 1995]; б – разрез (а) с выделенными трендами отражений (авторы статьи); с – разрез (б) с интерпретированными геологическими границами (авторы статьи); д – сейсмо-геологическая модель (авторы статьи): 1 – кратер Маникуаган, 2 – габбро-анортозит, 3 – аллохтон, 4 – параавтохтон, 5 – автохтон, кратон Сьюпириор, 6 – нижняя кора, 7 – мантия; е – интерпретация сейсмического профиля по [Eaton et al., 1995]: GT – террейн Ганьон (Gagnon), MSB – сдвиговый пояс Маникуаган, HJT – террейн Харт-Жан (Hart Jaune), GaD – домен Габриэль (Gabriel), CD – домен Каньон (Canyon), ID – домен Айланд (Island), SWD – Юго-западный (Southwest) домен, HJF – разлом Харт-Жан (Hart Jaune), GaF – разлом Габриэль (Gabriel); ф – немигрированная сейсмическая запись для линии AG-55 с интерпретированными основными разломами, отмеченными жирными пунктирными линиями; жирная сплошная линия отмечает интерпретированное положение деколлемента в основании террейна Ганьон (Gagnon), по [Hynes et al., 2000].

Fig. 2. The Earth's crust and crust-mantle boundary along AG-55 profile. a – automatic line drawing produced from migrated seismic section after [Eaton et al., 1995]; b – seismic section from (a) with interpreted reflection trends (paper's authors); c – seismic section from (b) with interpreted with interpreted geological boundaries (paper's authors); d – seismo-geological model (paper's authors): 1 – Manicouagan crater, 2 – gabbro-anorthosite, 3 – allochthon, 4 – paraautochthon, 5 – autochthon, Superior craton, 6 – lower crust, 7 – mantle; e – interpretation of seismic profile according to [Eaton et al., 1995]: GT – Gagnon terrane, MSB – Manicouagan shear belt, HJT – Hart Jaune terrane, GaD – Gabriel domain, CD – Canyon domain, ID – Island domain, SWD – Southwest domain, HJF – Hart Jaune fault, GaF – Gabriel fault; f – the unmigrated seismic record for line AG-55 with the interpreted positions of the major faults marked by heavy dashed lines, the heavy solid line marks the interpreted position of the decollement at the base of Gagnon terrane after [Hynes et al., 2000].

4. Обсуждение

К настоящему времени исследования импактных структур на континентах, как правило, ограничены глубинами, не превышающими нескольких км: предполагается, что импактное воздействие также ограничено этими относительно небольшими глубинами [e.g.,

Friese et al., 1996; Mazur, 2000; Mazur et al., 2000; Catchings et al., 2001; Abels et al., 2002; Hawke, 2004; Lester et al., 2006; Obodovsky, 2019]. Единственное исключение составляет астроблема Вредефорт (Vredefort) в Южной Африке: сейсмический профиль длиной 112 км, выполненный методом отраженных волн, совместно с данными двух 250-км профилей

преломленных волн предоставляют сейсмический образ коры до глубины около 40 км. Результаты гравитационного моделирования вдоль профилей преломленных волн через структуру Вредефорт демонстрируют поднятие верхней границы нижней коры на 5-6 км под центральным поднятием астроблемы. Соответствующее поднятие Мохо ~4 км обнаружено изгибом тренда сейсмических отражений. Эта особенность свидетельствует о развитии связанных с импактом деформаций от поверхности коры до коро-мантийной границы, включая подкоровую область мантии. Отсутствие отчетливого «отражательного Мохо» предполагает плавный переход от коры к мантии на расстоянии нескольких километров [Durrheim et al., 1991; Henkel, Reimold, 1998].

4.1. 3D модель земной коры астроблемы Маникуаган

Сравнение разработанного авторами этой статьи интерпретационного геологического разреза (рис. 2d) с интерпретационными разрезами в [Eaton et al., 1995; Hynes et al., 2000] и 3D моделью коры, утилизирующей данные сейсмике и гравике [Eaton, Hynes, 2000], демонстрирует сходство выделенных всеми авторами структурных направлений в верхней и отчасти в средней части коры. Однако, в отличие от нашего интерпретационного геологического разреза, модели геологической среды в перечисленных публикациях не фиксируют особенности строения коры, которые могли быть созданы в результате импактного воздействия.

Астроблема Маникуаган не имеет очевидных топографических свидетельств кольцевого строения. Поэтому высказывавшее ранее предположения о том, что Маникуаган изначально был морфологически подобен многокольцевому бассейну, как это определено на Луне [Wood, Head, 1976; Floran, Dence, 1976] не поддерживалось напрямую ни доступными геологическими, ни

геоморфологическими (топографическими) данными. Наличие сложного центрального пика и недостаточно очевидных кольцевых форм рельефа позволяли предполагать, что доэрозионная форма Маникуагана была эквивалентна кратеру с центральным пиком или, возможно, включающему центральный пик кольцевому бассейну [Wood, Head, 1976].

Речная система аналогичной геометрии к северу от астроблемы Маникуаган указывает на вероятность существования сопутствующего кратера-близнеца (twin craters): проведенные по гидросети границы которого почти точно совпадают с закартированными границами террейна Лелукуау. Террейн Лелукуау состоит из расчлененного АМЧГ комплекса (датированного около 1.63 млрд лет) [Hynes et al., 2000 and references therein; Indares, Dunning, 2017]. Прямые свидетельства импактного воздействия в породах этого террейна не обнаружены. Тем не менее, особенности рельефа и изолированное положение этого террейна указывают на целесообразность специализированного поиска свидетельств импактного воздействия (или отсутствия таких свидетельств).

В наш комплексный анализ впервые вовлечены региональные геологические и геофизические данные и результаты интерпретации сейсмических образов коры по профилю AG-55. Объемная модель глубинного строения астроблемы Маникуаган, объединяющая данные геологического и геофизического картирования (рис. 1) и сейсмопрофилирования методом отраженных волн (рис. 2), представлена на рис. 3. Достоверность модели несколько ограничена из-за того, что центральное поднятие, внутреннее плато и кольцевой ров остались за пределами профиля AG-55. Кроме того, внешняя область астроблемы также в значительной части осталась за пределами профиля AG-55. Тем не менее, анализ объемной модели позволяет отметить и обсудить ряд важных, не акцентированных или вовсе не

отмечавшихся ранее особенностями глубинного строения астроблемы от современного рельефа до коро-мантийной границы, в том числе, глубину импактного воздействия, строение метеоритного кратера и внешних относительно кратера областей астроблемы. Особенности строения астроблемы, представленные в 3D модели, можно

экстраполировать на территорию астроблемы в целом. Ориентируясь на особенность геологического строения, в пределах этой территории выделяются чередующиеся дугообразные антиформы (валы) и синформы (депрессии), формирующие зональное строение астроблемы (рис. 4а, 4b).

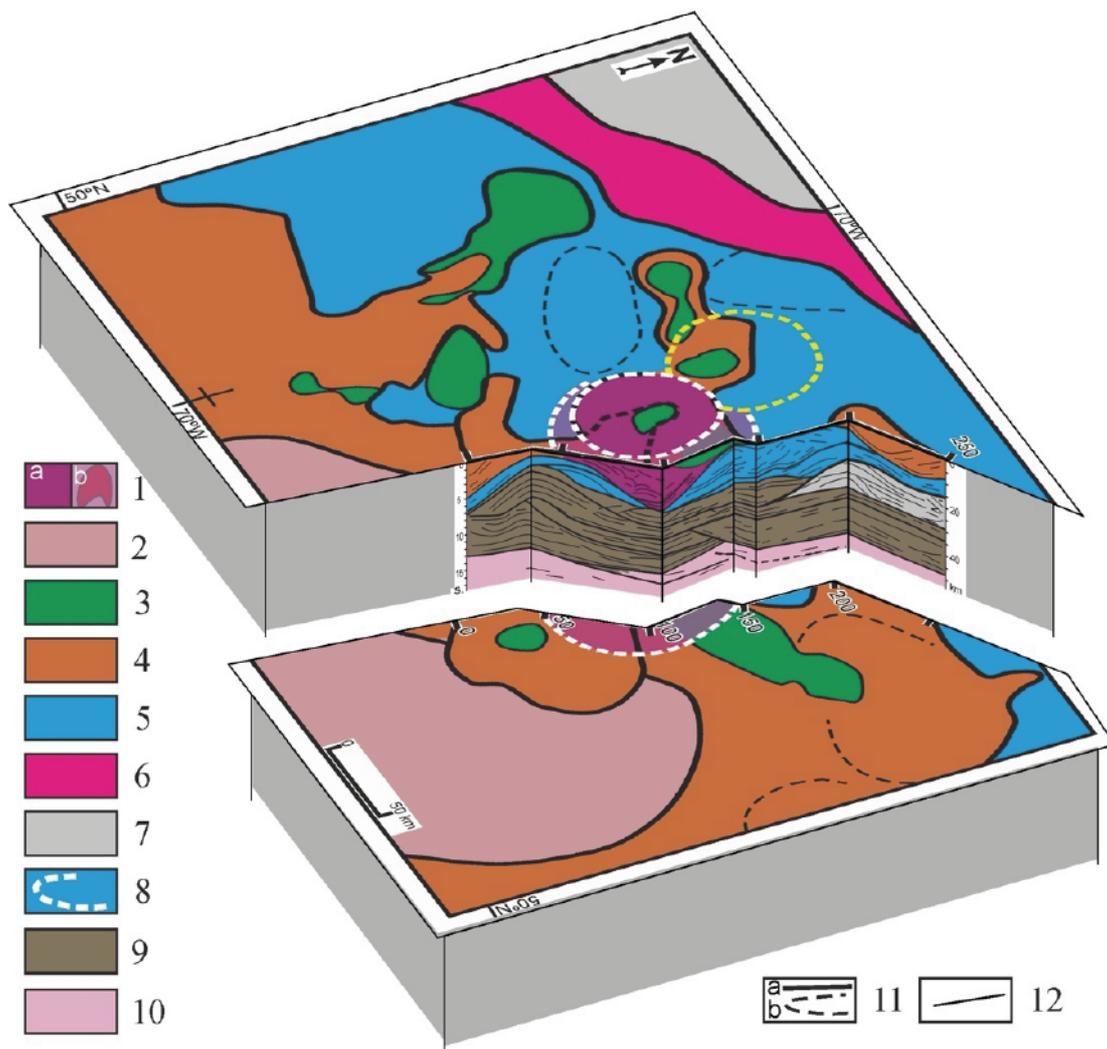


Рис. 3. Трехмерная модель (блок-схема) глубинного строения земной коры в районе импактной структуры Маникуаган и окружающей территории. 1 – кратер Маникуаган: а – внутри кольцевого рва, б – отрисованный по данным сейсмопрофилирования отраженных волн; 2 – овоид; 3 – тела габбро-анортозитов и анортозитов, 4 – аллохтон; 5 – параавтохтон-1, маломангнитные гнейсы; 6 – параавтохтон-2, высокомагнитные граниты, 7 – автохтон, кратон Сьюпириор; 8 – границы ударных кратеров; 9 – нижняя кора; 10 – мантия; 11– тектонические границы (а), тренды магнитных аномалий (б); 12 – тренды сейсмических отражений.

Fig. 3. A 3D model (block diagram) of the deep crustal structure of The Manicouagan impact structure and surrounding area. 1 – Manicouagan crater: a – within annular moat, b – drawn in accordance with reflection seismic data; 2 - ovoid; 3 – gabbro-anorthosite and anorthosite bodies, 4 – allochthon; 5 – paraautochthon-1, low-magnetic gneisses; 6 – paraautochthon-2, high-magnetic granites, 7 – autochthon, Superior craton; 8 – boundaries of the impact craters; 9 – lower crust; 10 – mantle; 11– tectonic boundaries (a), trends of the magnetic anomalies (b); 12 – seismic reflection trends.

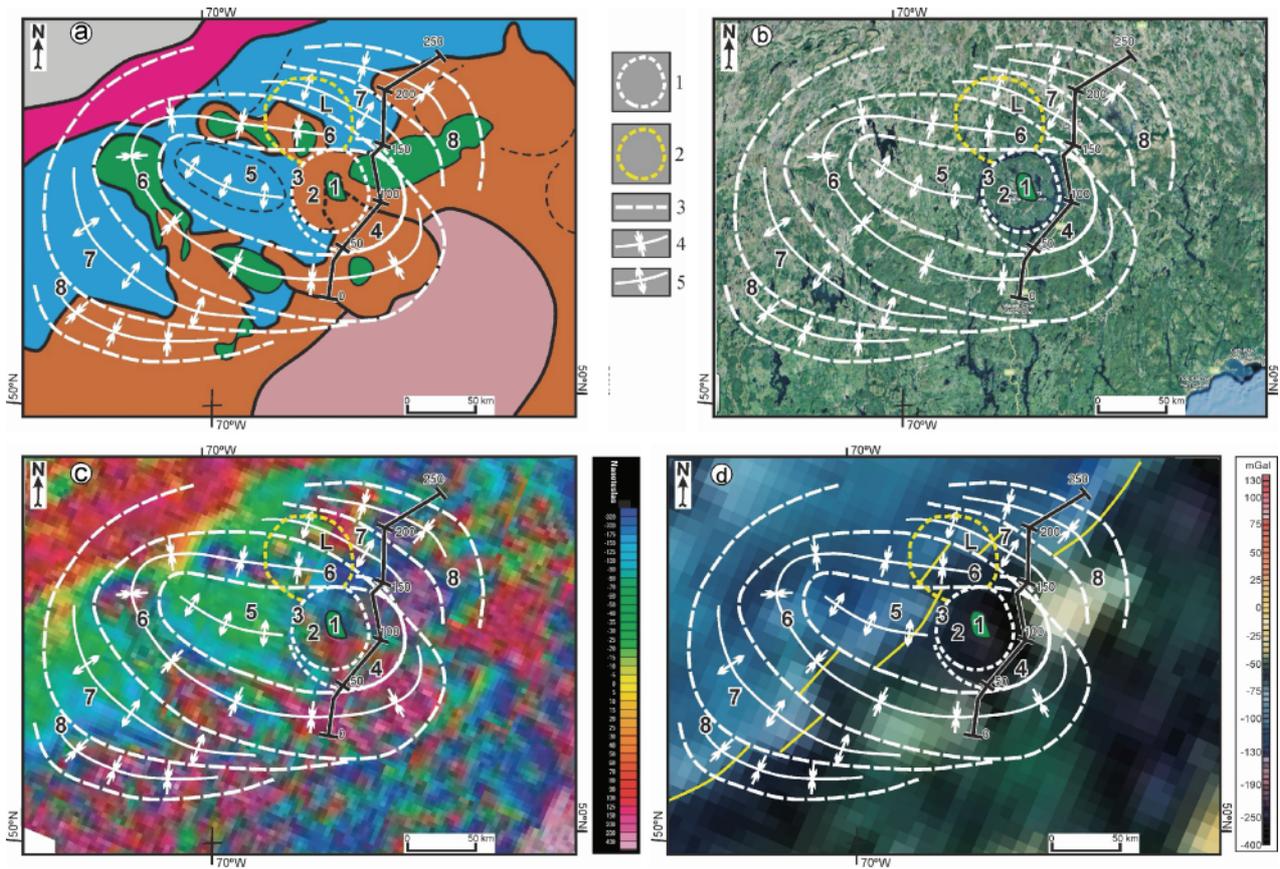


Рис. 4. Импактная структура Маникуаган и окружающая территория с предполагаемой системой концентрических овальных и дуговых антиформ (хребтов) и синформ (впадин): а – геологическая карта импактной структуры Маникуаган и окружающей территории; б – фрагмент карты Google; в – геологические границы, выделенные по карте магнитных аномалий Северной Америки [2002]; д – геологические границы, выделенные на карте магнитных аномалий, в сочетании с картой гравитационного поля Северной Америки [The Gravity Anomaly map of North America, 1989], приблизительная граница кратона Сьюпириор показана желтыми линиями.

1-2 – границы ударных кратеров: кратер Маникуаган (1), предполагаемый кратер к северу от Маникуаган (2); 3 – приблизительные границы концентрических овальных и дугообразных антиформ (хребтов) и синформ (впадин); 4 – синформы; 5 – антиформы.

Fig. 4. The Manicouagan impact structure and surrounding area with an inferred system of concentric oval and arc antiforms (ridges) and synforms (depressions): а – geological map of the Manicouagan impact structure and surrounding area; б – fragment of the google map; в – geological boundaries based on the Magnetic anomaly map of North America [2002]; д – geological boundaries deciphered on the Magnetic anomaly map shown in combination with the Gravity Anomaly map of North America [1989], the approximate limit of the Superior craton is shown in yellow lines.

1-2 – boundaries of the impact craters: Manicouagan crater (1), the suggested crater north of Manicouagan (2); 3 – approximate boundaries of the concentric oval and arc antiforms (ridges) and synforms (depressions); 4 – synforms; 5 – antiforms.

Строение метеоритного кратера

На интерпретационном разрезе обозначена конусовидная депрессия импактного происхождения, то есть собственно метеоритный кратер Маникуаган. 3D модель демонстрирует пространственную близость изображения конической депрессии на геологическом разрезе с размещением кольцевого рва.

Рисунок отражений в краевой части конической депрессии в сечении профилем позволяет предполагать, что между кольцевым рвом и внешним диаметром кратера, который пересечен профилем, размещена зона конических трещин-разломов шириной около 10 км. Ширина кратера, включая эту зону, достигает 75 км. В сечении профилем AG-55

основание метеоритного кратера (конической депрессии) достигает верхней границы средне-нижнекоровой зоны рефлексивити на глубине 20 км. Размещение и особенности сейсмического образа позволяют интерпретировать синформу в качестве сечения профилем краевой части кратера Маникуаган за пределами кольцевого рва. В строении кратера участвуют три главных структурно-вещественных элемента.

1. Центральное поднятие диаметром 25 км, сложенное выведенными с глубины породами, неравномерно подвергшимися шоковому метаморфизму, которые вмещают габбро-анортозиты, пронизанные жилы псевдотахилитов, и пластинообразные тела расплавных импактитов.

2. Внутреннее плато диаметром 55 км, ограниченное кольцевым рвом, образовано расплавными импактитами, которые подстилаются породами основания, подвергшимися деформациям и шоковому метаморфизму.

3. Кольцевой ров диаметром 65 км, вмещающий блоки интенсивно деформированных ордовикских известняков.

Эти три зоны соответствуют перечисленным выше первым трем «морфологическим элементам» в строении астроблемы, выделенным по топографическим и структурным характеристикам (morphological elements based on topography and structural style) [Floran, Dence, 1976; Orphal, Schultz, 1978].

4. Внешняя часть кратера за пределами кольцевого рва, заполненная деформированными Гренвиллскими породами, которую пересекает профиль AG-55.

Центральное поднятие

Центральное поднятие диаметром 25 км с горой Вавилон (Mont de Babel) высотой около 910 м сложено выведенными с глубины породами. Согласно [Biren, Spray, 2010], поднятие возвышается более чем на 300 м над уровнем расплавных пород. Центральная вершина горы представляет собой горст габбро-

анортозита [Currie, 1972; Floran, Dence, 1976; Murtaugh, 1976; Orphal, Schultz, 1978]. Связанные с ним холмы-спутники, также образованные анортозитом, могут быть горстами, составляющими часть пикового кольца или сложного центрального пика [Floran, Dence, 1976; Orphal, Schultz, 1978]. Породы неравномерно подверглись шоковому метаморфизму, отличаются вызванной импактом дискретной деформацией и пронизаны тонкими жилками импактного расплава, кристаллизовавшимся при ~1350°C.

Согласно [Spray, Thompson, 2008], в центральном поднятии преобладают анортозитовые породы, похожие на компоненты Лунных Гор. По мнению этих авторов, анортозитовые породы трудно объяснить «центральной поднятием» докембрийского фундамента, потому что они отличаются по составу от других анортозитовых пород в районе Маникуаган [Kish, 1968]. Следует заметить, что эти авторы не имели петро-геохимических данных для количественного сравнения составов пород. Также и до настоящего времени детальные геохимические исследования габбро-анортозитов центрального поднятия и близких или аналогичных по составу пород из массивов габбро-анортозитов, широко распространенных в окрестностях астроблемы Маникуаган (рис. 1d), не проводились. С другой стороны, массивы габбро-анортозитов и анортозитов входят в состав АМЧГ и АРГ комплексов, чрезвычайно широко представленных в орогене Гренвилл [e.g., Bédard, 2010; McLelland et al., 2010; Rivers et al., 2012], которые образуют КМП (LIP). Ранее было показано, что КМП подстилаются нижней корой, которая образована мафитовыми гранулитам и пронизана послойными интрузивами габброидного и габбро-анортозитового состава (нижнекоровой зоной рефлексивити, зоной интенсивных субпараллельных сейсмических отражений) [Минц и др., 2010; Mints, 2015; Mints et al., 2015; Glaznev et al., 2015]. Принимая

во внимание эту закономерность, мы предполагаем в качестве наиболее вероятной версии, что габбро-анортозиты центрального поднятия являются отторженцем средне-нижнекоревой зоны рефлексивити, вырванным, деформированным и поднятым в результате метеоритного удара (импакта) (рис. 5).

Внешние области астроблемы

1. Метеоритный кратер обрамлен (рис. 4) дугообразными валообразными овальными в плане антиформами, сложенными поднятыми низкомагнитными гнейсами Параавтохтонного пояса и частично породами средней-нижней коры. Антиформы чередуются с овальными и дугообразными и синформами, сформированными гнейсами повышенной магнитности, вмещающими тела габбро-анортозитов, которые принадлежат перекрывающему Параавтохтон Аллохтонному поясу. Максимальный внешний радиус системы концентрических зон равен ~300 км. Эти особенности указывают на принадлежность астроблемы Маникуган типу многокольцевых бассейнов, известных на Луне, Марсе и Меркурии [Hartmann, Wood, 1971; Wood, Head, 1976; Taylor, 1982; Grieve et al., 2008; Head, 2010]. Единственной импактной структурой на Земле, которую до настоящего времени можно было соотносить с типом многокольцевых бассейнов оставался кратер Вредефорт в Южной Африке с внешним диаметром около 200 км [Grieve et al., 2008].

2. Внутренняя антиформная структура длиной 100 км и шириной 50 км, образованная низкомагнитными породами Параавтохтонного пояса, которая непосредственно сопряжена с метеоритным кратером, протягивается в запад-северо-западном направлении.

3. Внутренняя овальная синформная структура, преимущественно сложенная магнитными гнейсами и габбро-анортозитами Аллохтонного пояса, длиной 200 км и шириной 100 км по осевой линии при ширине собственно антиформы 50 км. Согласно [Floran, Dence,

1976], это – интенсивно поросшая лесом (a heavily forested region) Внешняя нарушенная зона (Outer disturbed zone) (см. рис. 4b).

4. Внешняя овальная антиформная структура, сложенная низкомагнитными гнейсами Параавтохтонного пояса, длиной 220 км и шириной 120 км по осевой линии при ширине собственно синформы 30-50 км. В современном рельефе этой зоне частично соответствует низина, поэтому ранее она получила не вполне удачное наименование «Внешняя периферическая депрессия» (Outer circumferential depression) [Floran, Dence, 1976; Orphal, Schultz, 1978].

5. Фрагментарно наблюдаемая овальная синформная структура, сложенная магнитными гнейсами Аллохтонного пояса и низкомагнитными породами Параавтохтонного пояса, шириной 250 км по осевой линии при ширине, собственно, антиформы 30 км.

6. На профиле AG-55 впервые выделена средне-нижнекоревая область интенсивных субгоризонтальных сейсмических отражений (зона рефлексивити) необычно большой мощности, локально более 20 км, перекрывающая гладкую коро-мантийную границу с небольшими деформациями. По крайней мере, верхняя часть этой области коры участвует в строении валообразных антиформ, обрамляющих метеоритный кратер.

Сопоставление системы чередующихся антиформ и синформ с космическим изображением региона свидетельствует об определенной связи форм рельефа и характера растительности с размещением антиформ и синформ (рис. 4b). Это касается, в частности, геометрии речной сети, отчетливо демонстрирующей кольцевой ров, повышенной залесенности зон синформного строения, особенно зоны 6, а также морфологии малых форм рельефа (гряд, холмов). Сопоставление той же системы с картой аномального магнитного поля также демонстрирует согласованные характеристики магнитного поля и принятой

зональности. Синформам преимущественно соответствует отрицательное магнитное поле, в антиформам – преимущественно положительное поле. Сопоставление с гравитационной картой обнаруживает смещения границы низкого уровня поля, связанные с размещением автохтона – гранит-зеленокаменного комплекса кратона Сьюпириор: границы относительно повышенных значений несколько смещены в пределах синформ к северо-западу.

С внутренним плато, ограниченным кольцевым рвом (зона 2), связано локальное понижение поля силы тяжести, на 50-65 мГал (рис. 4d). Это понижение не коррелируется с характеристикой магнитного поля над внутренним плато и, следовательно, не связано с размещением низкоплотного объекта близ поверхности рельефа. Судя по сейсмическому образу коры, в качестве низкоплотного объекта можно принять заполнение кратерной депрессии.

Известные на Земле и на планетах земной группы концентрическая зональность метеоритных кратеров проявлена в морфологии и размещении соответствующих форм рельефа, таких как: кольцевые «морщинистые» хребты (wrinkle ridges), «пики-кольца», кольцевые кратеры, концентрические грабены и центральные пики. В отличие от других концентрически-зональных импактных структур, реконструированная авторами этой статьи концентрическая зональность астроблемы Маникуаган имеет согласованное отражение в сейсмическом образе коры по профилю AG-55 и его геологической интерпретации, в характеристиках магнитного и гравитационного полей и в особенностях рельефа и растительности в пределах астроблемы, продемонстрированное космическим изображением.

Примечательной особенностью структурно-вещественной зональности астроблемы является ее асимметрия: северо-западная ориентировка длинных осей овальных зон и размещение

внутреннего плато, ограниченного кольцевым рвом, приблизительно в фокусе системы концентрических овалов. Эти особенности могут указывать на наклонную траекторию падения метеорита, перемещавшегося в атмосфере в северо-западном направлении (в сегодняшних координатах).

4.2. Модель-реконструкция астроблемы Маникуаган

Завершающим результатом нашего исследования является модель-реконструкция астроблемы Маникуаган. В этой зафиксированы принципиальные особенности строения и формирования астроблемы Маникуаган.

Когда внеземные тела диаметром в десятки метров и более сталкиваются с Землей, благодаря высокой скорости (средняя скорость 25 км в секунду) они обладают значительной кинетической энергией. При ударе основная часть этой энергии передается на породы цели, что приводит как к выемке кратера, так и к возникновению механических и метаморфических эффектов ударной волны. Передача энергии осуществляется посредством радиально распространяющейся ударной волны с пиковым давлением в миллионы бар в точке удара. Ударная волна перемещает целевые породы радиально вниз и наружу. За ударной волной следует серия волн разрежения, возвращающих пораженные целевые породы к нормальному давлению. В результате взаимодействия этих волн формируются чашеобразные (простые) кратеры с круглым контуром, обрамленным валом. Механизмы образования сложных кратеров и впадин с приподнятыми центральными пиками и/или кольцами менее изучены [Grieve et al., 1988]. Мощным инструментом для исследования образования крупных ударных кратеров является численное моделирование. Выводы, основанные на численном моделировании, нуждаются в подтверждении данными геологических наблюдений [Collins et al., 2004].

Процессы, в результате которых образуются большие ударные кратеры, сопровождающиеся мгновенным высвобождением огромного количества энергии, не могут быть воспроизведены в лаборатории. Все наши знания о больших ударных структурах являются косвенными и получены в результате объединения теоретических и экспериментальных исследований ударных волн, экспериментального воспроизведения небольших кратеров и геологического исследования крупных земных ударных структур. Процесс образования кратеров сложен, многие детали все еще не определены, и ни расчеты, ни прогнозы не могут быть сделаны с твердой уверенностью [French V. M., 1998]. Многокольцевые ударные бассейны были обнаружены на поверхности почти всех планетных тел Солнечной системы с твердой корой. Детали механизма их образования также до сих пор не ясны.

В природных условиях эволюция земной поверхности, подвергшейся метеоритному удару, подобно процессам в надплюмовой области, определяется упруго-хрупко-пластической деформацией, наличием свободной поверхности и реологической стратификацией литосферы. Численные термо-механические эксперименты показывают, что вследствие изгибания литосферной плиты, механического разделения земной коры и мантии и нестабильных условий растяжения-сжатия, литосферная плита и рельеф поверхности в надплюмовой области подвергаются складчатости: формируется концентрическая система чередующихся волнообразных антиформ и синформ (поднятий и опусканий) различного масштаба [Burov, Guillou-Frottier, 2005; Burov, Gerya, 2014]. Численные эксперименты с трехслойной реологически стратифицированной латерально гомогенной континентальной литосферой показывают, что 3D топография земной поверхности над мантийным плюмом контролируется относительно толщиной жесткой верхней

коры, пластичной нижней коры и жестко-пластичной мантийной литосферы.

При численном моделировании формирования метеоритных кратеров принимают [Иванов, 2005] двухслойную (гранитная кора, покрывающая дунитовую мантию) или трехслойную (верхняя кора – нижняя кора – мантия; осадочный слой – кристаллический фундамент – мантия) структуру мишени. Для численного моделирования астроблемы Вредефорт, цель была представлена тремя слоями: метаморфизованные осадки – гранитоиды – мантия. Численные модели образования земных кратеров описывают морфологически сложные кратеры с центральным поднятием глубинных пород в центре кратера. Однако известные модели не воспроизводят какие-либо дополнительные механизмы образования многих колец, характерных для лунных бассейнов [Collins et al., 2004; Иванов, 2005].

Результаты нашего исследования предлагают принципиально новую информацию о строении литосферы, включающей астроблему Маникуаган. Поскольку раннепалеозойские (от позднего докембрия до девона) породы Аппалачского орогена перемещены непосредственно на мезо-неопротерозойский ороген Гренвилл и кольцевой ров астроблемы вмещает блоки деформированных ордовикских известняков, можно предположить, мощность осадочного чехла, перекрывающего ороген в момент метеоритного удара не была значительной. На рис. 5а представлен идеализированный разрез коры в районе астроблемы без осадочного чехла. Разрез включает четыре «слоя», соответствующие главным структурно-тектоническим элементам орогена Гренвилл (сверху вниз): аллохтон – параавтохтон – нижняя кора – мантия. Деформация этих слоев, вызванная ударом метеорита, различна (рис. 5b). Наиболее интенсивному, но принципиально различному воздействию подверглись аллохтон и

параавтохтон. Породы параавтохтона, пластически выжатые в обрамление метеоритного кратера, сформировали концентрические валы (антиформы), тогда как жесткие породы аллохтона сохранились от последующей денудации в концентрических синформных впадинах, чередующихся с антиформными структурами. Верхняя пластическая часть нижней коры также подверглась выжиманию, образовав ядра антиформ. Нижняя часть нижнекорового слоя в сечении профилем AG-55 не имеет явных признаков деформации. Соответственно, максимальная глубина кратерной депрессии и процессы в нижней коре и на уровне коро-мантийной границы непосредственно под кратером остались не охарактеризованными. Подобие габбро-анортозитов центрального поднятия и массивов в обрамлении кратера свидетельствуют в пользу предположения о формировании поднятия в результате ударного воздействия на породы нижней коры.

4.3. Новые данные о глубинном строении докембрийской коры орогена Гренвилл

Профиль AG-55 был отработан по программе LITHOPROBE в пределах трасекта Абитиби-Гренвилл (Abitibi-Grenville, AG). Главная цель сейсмических и геологических интерпретационных исследований была предопределена постулированной идеей Wynne-Edwards [1972], согласно которой ороген Гренвилл представляет собой превосходный пример эксгумированной коллизионной зоны типа «континент-континент», аналогичной Гималайскому орогену. Как на ранней, так и на завершающей стадии исследований этот постулат не подвергался сомнению, в качестве главных задач были выбраны: характеристика геологических доменов и границ между ними и разработка 3D моделей региональной архитектуры орогена Гренвилл [e.g., Eaton, Hynes, 2000; Hynes, 2000; Hynes et al., 2000; Ouassaa et al., 2010].

Главное внимание было направлено на геологическую интерпретацию сейсмического образа верхней коры, где корреляция трендов сейсмических отражений и геологических структур на уровне рельефа достигается относительно просто.

В нашем исследовании мы обратили специальное внимание на геологическую интерпретацию сейсмических образов средней и нижней коры. В результате, мы обнаружили зону рефлексивности неожиданно большой мощности 25-30 км, охватывающую нижне- и среднекоровый уровни. Подстилающая нижнюю кору гладкая и лишь незначительно нарушенная коро-мантийная граница полого погружается к северу под кратон Сьюпириор в интервале глубин от 40 до 48 км. Подобные картины отражений, рисующие образы нижней коры и коро-мантийной границы, характерны для внутриконтинентальных тектоно-магматических процессов формирования КМП (LIP), но, напротив, кардинально отличаются от сейсмических образов коры аккреционных орогенов [Минц, 2017; Минц и др., 2010, 2020; Mints, 2015; Mints et al., 2015, 2020; Glaznev et al., 2015]. Эти особенности средней-нижней коры и коро-мантийной границы указывают на внутриконтинентальное происхождение орогена Гренвилл и, в целом, Гренвилл-Свеко-норвежского орогена (ГСНО) [Минц и др., 2020]. Безусловно, существование нижнекоровой зоны рефлексивности и ее геологическая интерпретация, кардинально меняющие существующие представления о формировании ГСНО и, в частности, его составляющей – орогена Гренвилл, требует дополнительного подтверждения, прежде всего, на основе других сейсмических профилей, выполненных методом отраженных волн, которые пересекают ороген Гренвилл. Однако эта задача должна стать предметом другой статьи.

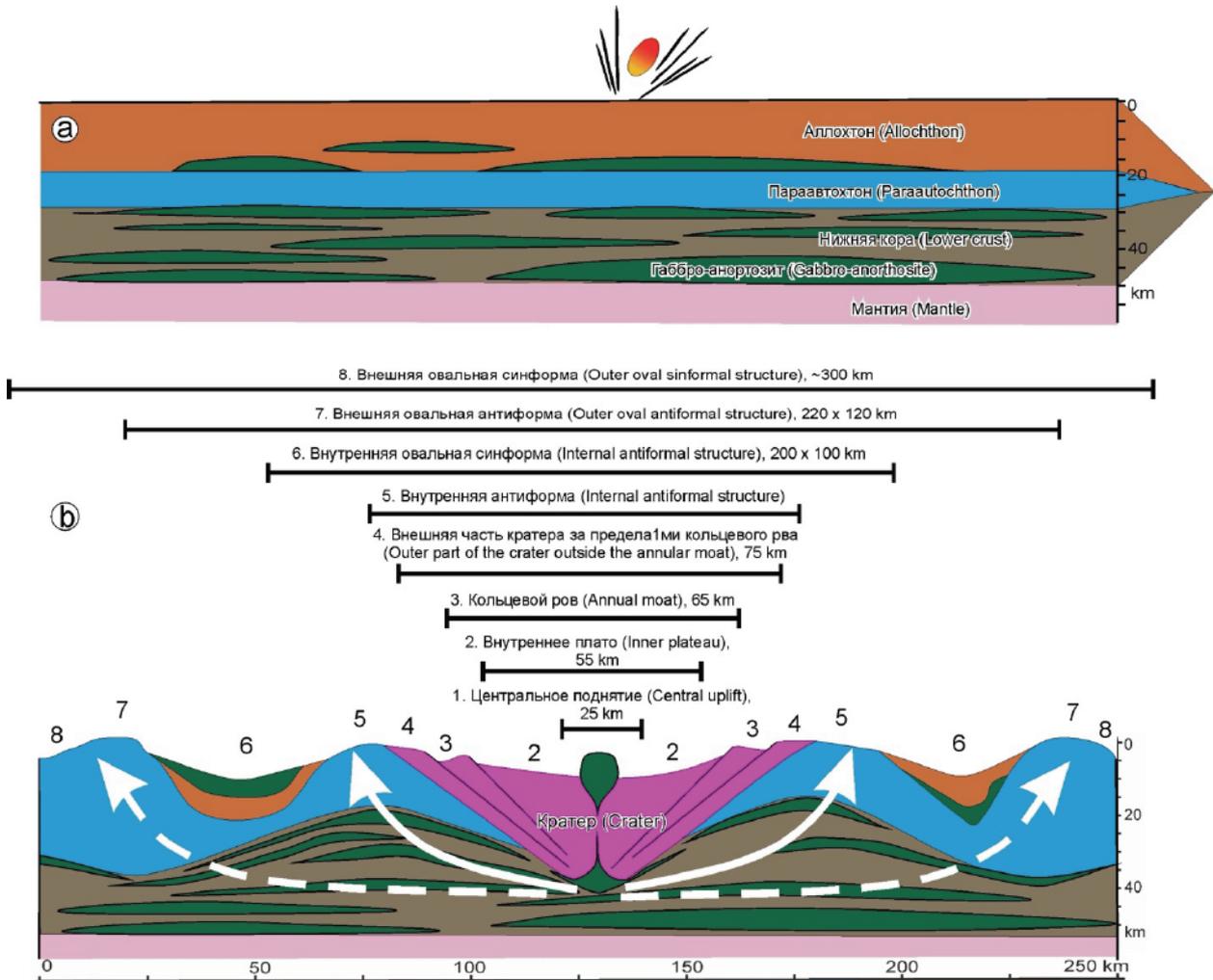


Рис. 5. Модель-реконструкция, в которой в идеализированном виде зафиксированы фундаментальные особенности строения и формирования астроблемы Маникуаган (см. пояснения в тексте).

Fig. 5. Model-reconstruction, in which the fundamental features of the structure and formation of the Manikouagan astrobleme are fixed in an idealized form (see explanations in the text).

5. Заключение

1. Задачи предшествующих исследований по методом отраженных волн сейсмического профиля AG-55 программы LITHOPROBE (1993 г.) по шоссе Québec-389 в непосредственной близости от кольцевого рва, обрамляющего кратер астроблемы Маникуаган, были ограничены проблемами докембрийской геологии; импактное воздействие на строение земной коры в районе астроблемы осталось за рамками этого исследования.

Сейсмический образ в сечении по профилю AG-55 демонстрирует два уровня коры, различающиеся структурными и механическими особенностями:

(1) верхний уровень от поверхности до глубины 25-30 км с крупными складками и разрывами, (2) нижний уровень от 25-30 км до коро-мантийной границы. В верхней области коры кратер симметрично обрамляют отчетливо прорисованные сейсмическими отражениями валообразные антиформные структуры с основаниями на глубине 25-30 км. Для нижнего уровня характерны сближенные интенсивные отражения (зона рефлексивити), полого погружающиеся к северо-восточному концу профиля. Гладкая незначительно нарушенная коро-мантийная граница, которая также полого погружается к северо-восточному концу профиля в интервале глубин

от 40 до 48 км, отделяет кору от акустически прозрачной мантии с неравномерно рассеянными короткими отражениями. В верхней области коры в непосредственном соседстве с кольцевым рвом выделяется коническая синформа, основание которой достигает глубины 20 км. Размещение и особенности геометрии сейсмических отражений позволяют интерпретировать синформу в качестве сечения профилем краевой части кратера Маникуаган за пределами кольцевого рва.

2. Астроблема Маникуаган – одна из крупнейших, среди размещенных в докембрийских кристаллических породах. Представленная в статье 3D модель, которая интегрирует региональные геолого-геофизические данные и геологическую интерпретацию сейсмического образа коры и коро-мантийной границы, демонстрирует главные особенности глубинного строения астроблемы. Метеоритный кратер обрамлен валообразными овальными в плане антиформами, которые чередуются с овальными и дугообразными синформами. Максимальный внешний радиус системы концентрических зон равен ~300 км. Эти особенности указывают на принадлежность астроблемы Маникуаган типу многокольцевых бассейнов, известных на Луне, Марсе и Меркурии. Примечательной особенностью структурно-вещественной зональности астроблемы является ее асимметрия: северо-западная ориентировка длинных осей овальных зон и размещение внутреннего плато, ограниченного кольцевым рвом, приблизительно в фокусе системы концентрических овалов. Эта особенность указывает на наклонную траекторию метеорита, перемещавшегося в атмосфере в северо-западном направлении (в сегодняшних координатах).

3. Концентрическая зональность астроблемы Маникуаган имеет согласованное отражение в сейсмическом образе коры по профилю AG-55 и его геологической интерпретации, в

характеристиках магнитного и гравитационного полей и в особенностях рельефа и растительности в пределах астроблемы.

4. При численном моделировании формирования метеоритных кратеров принимают двухслойную (гранитная кора, покрывающая дунитовую мантию) или трехслойную (верхняя кора – нижняя кора – мантия; осадочный слой – кристаллический фундамент – мантия) структуру мишени. Результаты нашего исследования предлагают новую информацию о строении литосферы, включающей астроблему Маникуаган. Идеализированный разрез включает четыре «слоя», соответствующие главным структурно-тектоническим элементам орогена Гренвилл (сверху вниз): аллохтон – параавтохтон – нижняя кора – мантия. Наиболее интенсивному, но принципиально различному ударному воздействию подверглись аллохтон и параавтохтон. Породы параавтохтона, пластически выжатые в обрамление метеоритного кратера, сформировали концентрические валы (антиформы), тогда как жесткие породы аллохтона сохранились от последующей денудации в синформных впадинах, чередующихся с антиформными структурами. Верхняя пластическая часть нижней коры также подверглась выжиманию, образовав ядра антиформ. Нижняя часть нижнекорового слоя в сечении профилем AG-55 не имеет явных признаков деформации. Максимальная глубина кратерной депрессии и процессы в нижней коре и на уровне коро-мантийной границы непосредственно под кратером остались не охарактеризованными. Подобие габбро-анортозитов центрального поднятия и массивов в обрамлении кратера свидетельствуют в пользу предположения о формировании поднятия в результате ударного воздействия на породы нижней коры.

5. На сейсмическом разрезе средняя и нижняя кора орогена Гренвилл в районе астроблемы Маникуаган

представлены зоной рефлексивити неожиданно большой мощности 25-30 км. Подстилающая нижнюю кору гладкая коро-мантийная граница лишь незначительно нарушена. Подобные образы нижней коры и коро-мантийной границы сопровождают внутриконтинентальные тектоно-магматические процессы формирования Крупных Магматических Провинций (LIP), но, напротив, кардинально отличаются от сейсмических образов коры аккреционных орогенов. Особенности средней-нижней коры и коро-мантийной границы указывают на внутриконтинентальное происхождение орогена Гренвилл. Безусловно, существование нижнекоровой зоны рефлексивити и ее геологическая интерпретация, кардинально меняющие существующие представления о формировании орогена Гренвилл, требует дополнительного подтверждения.

Благодарности

Авторы благодарны двум анонимным рецензентам за полезные замечания, которые позволили значительно уточнить главные выводы нашей работы. Работа выполнена в рамках Государственного задания Геологического института РАН (ГИН РАН), частично профинансирована РФФИ и является вкладом в проекты РФФИ № 19-05-00336 и № 20-05-00190.

Литература / Reference

1. Abels A., Plado J., Pesonen L.J., Lehtinen M., 2002. The Impact Cratering Record of Fennoscandia – A Close Look at the Database. In: Plado J., Pesonen L.J. (eds) *Impacts in Precambrian Shields. Impact Studies*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05010-1_1
2. Abramovitz, T., Thybo, H., Berthelsen, A., 1997. Proterozoic sutures and terranes in the southeastern Baltic Shield interpreted from BABEL deep seismic data. *Tectonophysics* 270,259–277. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00213-2)
3. Andersson J., Bingen B., Cornell D., Johansson L., Söderlund U., Möller C., 2008. The Sveconorwegian Orogen of Southern Scandinavia: Setting, Petrology and Geochronology of Polymetamorphic High-Grade Terranes. 33 IGC, excursion No 51, August 2–5, 2008. Oslo, 33 IGC, 83 p.
4. BABEL Working Group, 1990. Evidence for early Proterozoic plate tectonics from seismic reflection profiles in the Baltic Shield. *Nature*, 348, 34–38. <http://dx.doi.org/10.1038/348034a0>
5. Bédard, J.H., 2010. Parental magmas of Grenville Province massif-type anorthosites, and conjectures about why massif anorthosites are restricted to the Proterozoic. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 100, 77–103. <https://doi.org/10.1017/S1755691009016016>
6. Bérard, J., 1962. Summary geological investigation of the area bordering Manicouagan-Mouchalagane Lakes, Saguenay County. Québec Department of Natural Resources Preliminary Report 494, 14 p.
7. Biren, M.B., Spray, J.G., 2010. Shock veins in the central uplift of the Manicouagan impact structure. 41st Lunar and Planetary Conference, 2314.pdf.
8. Boggs, K.J.E., and Corriveau, L. 2004. Granulite-facies P-T-t paths and the influence of retrograde cation diffusion during polyphase orogenesis, western Grenville Province, Quebec. In: *Proterozoic tectonic evolution of the Grenville Orogen in North America*. In: R.P. Tollo, L. Corriveau, J. McLelland, and M.J. Bartholomew – eds. *Geological Society of America, Memoir* 197, 35–64. <https://doi.org/10.1130/0-8137-1197-5.35>
9. Burov, E., Gerya, T., 2014. Asymmetric three-dimensional topography over mantle plumes. *Nature* 513, 85–90. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13703>
10. Burov, E., Guillou-Frottier, L., 2005. The plume head – continental lithosphere interaction using a tectonically realistic formulation for the lithosphere. *Geophys. J. Int.* 161, 469–490. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02588.x>
11. Catchings, R.D., Saulter, D.E., Powars, D.S., Goldman, M.R., Dingler, J.A., Gohn, G.S., Schindler, J.S., and Johnson, G.H., 2001. High-Resolution Seismic Reflection/Refraction Images Near the Outer Margin of the Chesapeake Bay Impact Crater, York-James Peninsula, Southeastern Virginia. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-407, 18 p. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0407/>
12. Christensen, N.I., Mooney, W.D., 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research* 100 (B6), 9761–9788. <http://dx.doi.org/10.1029/95JB00259>
13. Coles, R.L., and Clarke, J.F. 1978. The central magnetic anomaly, Manicouagan structure,

- Quebec. *Journal of Geophysical Research* 83, 2805–2808.
<https://doi.org/10.1029/JB083iB06p02805>
14. Collins, G.S., Melosh, H.J., and Ivanov, B.I., 2004. Modeling damage and deformation in impact simulations. *Meteoritics & Planetary Science* 39 (2), 217–231. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00337.x>
 15. Cook, F.A., White, D.J., Jones, A.G., Eaton, D.W.S., Hall, J., Clowes, R.M., 2010. How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovičić discontinuity and crust–mantle transition. *Can. J. Earth Sci.* 47, 315–351. <https://doi.org/10.1139/E09-076>
 16. Cosca M.A., Mezger K., Essene E., 1998. The Baltica-Laurentia connection: Sveconorwegian (Grenvillian) metamorphism, cooling, and unroofing in the Bamble sector, Norway. *The Journal of Geology* 106 (5), 539–552. <https://doi.org/10.1086/516040>
 17. Culotta, R.C., Pratt, T., and Oliver, J., 1990. A tale of two sutures: COCORP's deep seismic surveys of the Grenville province in the eastern U.S. mid-continent. *Geology*, 18 (7), 646–649. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0646:ATOTSC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0646:ATOTSC>2.3.CO;2)
 18. Currie, K.L., 1972. Geology and petrology of the Manicouagan resurgent caldera, Quebec. *Geological Survey of Canada. Bull* 198, 153 p.
 19. Davidson, A., 1998. An overview of Grenville Province geology, Canadian Shield. In: S.B. Lucas and M.R. St-Onge (co-ordinators). *Geology of the Precambrian Superior and Grenville Provinces and Precambrian fossils in North America*. Geological Society of America, vol. 7, 205–271. ISBN electronic 9780813754468. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-C1>
 20. Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., Costanzo-Alvarez, V., 2010. Magnetic properties of rocks of the Kapuskasing uplift (Ontario, Canada) and origin of long-wavelength magnetic anomalies. *Geophys. J. Int.* 183, 645–658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04778.x>
 21. Durrheim, R.J., Nicolaysen, L.O., Corner, B., 1991. A deep seismic reflection profile across the Archaean-Proterozoic Witwatersrand basin, South Africa. *Continental lithosphere: Deep seismic reflections*. AGU, *Geodyn. Ser.* 22, 213–224. <https://doi.org/10.1029/GD022p0213>
 22. Earth Impact Database, 2009. <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/> (Accessed: 27 January 2009).
 23. Eaton, D.W. and Hynes, A., 2000. The 3-D crustal structure in the Manicouagan region: new seismic and gravity constraints. *Can. J. Earth Sci.* 37, 307–324. <https://doi.org/10.1139/e99-089>
 24. Eaton, D.W., Hynes, A., Indares, A., and Rivers, T., 1995. Seismic images of eclogites, crustal-scale extension, and Moho relief in the eastern Grenville province, Quebec. *Geology* 23, 855–858. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0855:SIOECS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0855:SIOECS>2.3.CO;2)
 25. Floran, R.J., Dence, M.R., 1976. Morphology of the Manicouagan ring-structure, Quebec, and some comparisons with lunar basins and craters. *Proc. Lunar Sci. Conf.* 7th, 2845–2865.
 26. French B. M., 1998. *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston. 120 pp.
 27. Friese, A.E.W., Charlesworth, E.G., McCarthy, T.S., 1996. Tectonic processes within the Kaapvaal Craton during the Kibaran (Grenville) orogeny: Structural, geophysical and isotopic constraints from the Witwatersrand Basin and environs. *Econ. Geol. Res. Unit, Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg, Inf. Circ.* 292, 67 pp.
 28. Glaznev, V.N., Mints, M.V., Muravina, O.M., Raevsky, A.B., and Osipenko, L.G., 2015. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust–mantle boundary // *Geodynamics & Tectonophysics*. Vol. 6, issue 2, p. 133–170. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176>
 29. Gravity Anomaly Map Committee under the auspices of The Geological Society of America and International Gravity Commission, 1987. *Gravity Anomaly Map of North America* (Product Code: DNAGCSMS2, published: January 01, 1987). Pages: 5 sheets. <https://search-works.stanford.edu/view/12119113>
 30. Grieve, R.A.F., Floran, R.J., 1978. Manicouagan Impact Melt, Quebec 2. Chemical interrelations with basement and formation processes. *J. Geophys. Res.* 83 (B6), 2761–2771. <https://doi.org/10.1029/JB083iB06p02761>
 31. Grieve, R. A. F., Head, J. W., 1983. The Manicouagan impact structure: An analysis of its original dimensions and form. *J. Geophys. Res.* 88, A807–A818. <https://doi.org/10.1029/JB088IS02P0A807>
 32. Grieve, R.A.F., Wood, C.A., Garvin, J.B., McLaughlin, G., McHone, J.F., eds., 1988. *Astronaut's Guide to Terrestrial Impact Craters*, LPI Tech Rpt. 88-03. Lunar and Planetary Institute, Houston. 89 pp.
 33. Grieve, R.A.F., Reimold, W.U., Morgan, J., Riller, U., and Pilkington, M., 2008. Observations and interpretations at Vredefort, Sudbury, and Chicxulub: Towards an empirical model of terrestrial impact basin formation. *Meteoritics & Planetary Science* 43 (5), 855–882.
 34. Hammer, P.T.C., Clowes, R.M., Cook, F.A., Van der Velden, A.J., Vasudevan, K., 2010. The Lithoprobe trans-continental lithospheric cross sections: imaging the internal structure of the North American continent. *Canadian Journal Earth Sciences* 47, 821–857. <https://doi.org/10.1139/E10-036>

35. Hanna, W.F., Sweeney, R.E., Hildenbrand, T.G., Tanner, J.G., McConnell, R.K., Godson, R.H., 1989. The gravity anomaly map of North America. Chapter 2. In: Bally, A.W., Palmer, A.R. (eds.). The geology of North America – An overview. Boulder, Colorado, Geological Society of America, Vol. A, 17-28. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-A.17>
36. Hartmann, W.K., Wood, C.A., 1971. Moon: Origin and evolution of multi-ring basins. *The Moon* 3, 3-78. <https://doi.org/10.1007/BF00620390>
37. Hawke, P.J., 2004. The geophysical signatures and exploration potential of Australia's impact structures. The thesis for degree of PhD, the University of Western Australia, 343 p.
38. Head, J.W., 2010. Transition from complex craters to multi-ringed basins on terrestrial planetary bodies: Scale-dependent role of the expanding melt cavity and progressive interaction with the displaced zone. *Geophysical Research Letters* 37, L02203. <https://doi.org/10.1029/2009GL041790>
39. Henkel, H., and Reimold, W.U., 1998. Integrated geophysical modelling of a giant, complex impact structure: anatomy of the Vredefort Structure, South Africa. *Tectonophysics* 287, 1-20. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)80058-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)80058-9)
40. Holliger, K., Levander, A., 1994. Lower crustal reflectivity modeled by rheological controls on mafic intrusions. *Geology* 22, 367-370. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0367:LCRMBR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0367:LCRMBR>2.3.CO;2)
41. Hynes A., Rivers T., 2010. Protracted continental collision – evidence from the Grenville orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences* 47 (5), 591-620. <https://doi.org/10.1139/E10-003>
42. Hynes, A., Indares, A., Rivers, T., Gobeil, A., 2000. Lithoprobe line 55: integration of out-of-plane seismic results with surface structure, metamorphism, and geochronology, and the tectonic evolution of the eastern Grenville Province. *Can. J. Earth Sci.* 37, 341-358. <https://doi.org/10.1139/e99-076>
43. Indares, A. and Dunning, G., 2017. Metamorphic evolution of the central Grenville Province (Manicouagan area): a review. In: Moukhsil, A. (ed.) Government of Quebec Report MM2017-01, 172-190.
44. Kish, L., 1968. Hart-Jaune River area. Québec Department of Natural Resources Preliminary Report 132, 98 pp.
45. Kletetschka, G., Stout, J.H., 1998. The origin of magnetic anomalies in lower crustal rocks, Labrador. *Geophysical Research Letters* 25 (2), 99-202. <https://doi.org/10.1029/97GL03506>
46. Korhonen F.J., 2006. An Investigation into Tectonometamorphic Evolution of the Wilson Lake Terrane, Eastern Grenville province. PhD dissertation. University of Minnesota, 283 p.
47. Kukkonen I.T., Lahtinen R. (Eds.), 2006. Finnish reflection experiment FIRE 2001-2005. Geological Survey of Finland, Special Paper 43, 247 p.
48. Lester, W.R., Hole, J.A., Imhoff, M.G., and Burbey, T.J., 2006. Structure of the Chesapeake Bay Impact Crater from Wide-Angle Seismic Waveform Tomography. Conference: AGU Fall Meeting, 37 p.
49. Ludden, J., Hynes, A., 2000. The Lithoprobe Abitibi-Grenville transect: two billion years of crust formation and recycling in the Precambrian Shield of Canada. *Can. J. Earth Sci.* 37, 459-476. <https://doi.org/10.1139/e99-120>
50. Magnetic Anomaly Map of North America, scale 1:10 000 000, 2002. North American Magnetic Anomaly Group (NAMAG): Bankey, V., Cuevas, A., Daniels, D., Finn, C.A., Hernandez, I., Hill, P., Kucks R., Miles, W., Pilkington, M., Roberts, C., Roest, W., Rystrom, V., Shearer, S., Snyder, S., Sweeney, R., and Velez, J., edited by F.C. Brunstein, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-414/>
51. Martignole, J., Calvert, A., Friedman, R., and Reynolds, P. 2000. Crustal evolution along a seismic section across the Grenville province (western Quebec). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37(2-3), 291-306. <https://doi.org/10.1139/cjes-37-2-3-291>
52. Mazur, M.J., 2000. The seismic characterization of meteorite impact structures (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB. <https://doi.org/10.11575/PRISM/18283>
53. Mazur, M.J., Stewart, R.R., and Hildebrand, A.R., 2000. The seismic signature of meteorite impact structures. *CSEG Recorder* 25 (6), 12 p.
54. McLelland, J.M., Selleck, B.W., Bickford, M.E., 2010. Review of the Proterozoic evolution of the Grenville Province, its Adirondack outlier, and the Mesoproterozoic inliers of the Appalachians. In: Tollo, R.P., Bartholomew, M.J., Hibbard, J.P., Karabinos, P.M. (eds.). From Rodinia to Pangea: The Lithotectonic Record of the Appalachian Region. Geological Society of America Memoir 206, 1-29. [https://doi.org/10.1130/2010.1206\(02\)](https://doi.org/10.1130/2010.1206(02))
55. Mints M.V., 2015. Chapter 17. Evolution and major features of the Early Precambrian crust of the East European craton. In: Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., Belousova, E.A., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A., Dokukin, P.A., Kaulina, T.V., Natapov, L.M., Piip, V.B., Stupak, V.M., Suleimanov, A.K., Trusov, A.A., Van, K.V., Zamozhniaya, N.G. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure. The Geological Society of America Special Paper 510, 333-354. [https://doi.org/10.1130/2015.2510\(17\)](https://doi.org/10.1130/2015.2510(17))
56. Mints, M., Suleimanov, A., Zamozhniaya, N. and Stupak, V., 2009. A 3-D model of the Early

- Precambrian crust under the southeastern Fennoscandian Shield: Karelia Craton and Belomorian tectonic province. *Tectonophysics* 472 (1-4), 323-339 (Deep seismic profiling of the continents and their margins. Edited by T.Ito, T.Iwasaki, H.Thybo)
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.008>
57. Mints, M.V., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A., Kaulina, T.V., Trusov, A.A., 2015. Chapter 8. Late Paleoproterozoic Lapland–Mid-Russia–South Baltica intracontinental collisional orogen. In: Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., Belousova, E.A., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A., Dokukin, P.A., Kaulina, T.V., Natapov, L.M., Piip, V.B., Stupak, V.M., Suleimanov, A.K., Trusov, A.A., Van, K.V., Zamozhniaya, N.G. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure. *The Geological Society of America Special Paper* 510, pp. 173-256.
[https://doi.org/10.1130/2015.2510\(8\)](https://doi.org/10.1130/2015.2510(8))
 58. Mints, M.V., Glaznev, V.N., Muravina, O.M., Sokolova, E. Yu., 2020. A 3D model of the Svecofennian Accretionary Orogen and the Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modeling: geodynamic speculations // *Geoscience Frontiers* 11, 999–1023,
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003>
 59. Mooney, W.D., Meissner, R., 1992. Multi-genetic origin of crustal reflectivity: a review of seismic reflection profiling of the continental lower crust and Moho. In: Fountain, D.M., Arculus, R., Kay, R.W. (Eds.), *Continental Lower Crust*. Elsevier, Amsterdam, 45-79.
 60. Murtaugh, J.G., 1976. Manicouagan impact structure area. Ministère des Richesses Naturelles Québec. Direction générale des mines. Rapport, open file DPV-432, 180 p.
 61. Obodovsky, A., 2019. Impact craters in seismic data. *CSEG Recorder* 44 (1), 32-36.
 62. O'Dale, C.P. 2013. Manicouagan Impact Structure (modified 20 May 2013).
<https://www.webcitation.org/6jAM5HC2d?url=http://ottawa-rasc.ca/wiki/index.php?title=Odale-Articles-Manicouagan>
 63. Orphal, D.L., Schultz, P.H., 1978. An alternative model for the Manicouagan impact structure. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf* 9th, 2695-2712.
<https://hdl.handle.net/20.500.11753/1531>
 64. Ouassaa, K., Forsyth, D., and White, D., 2010. Data processing and preliminary interpretation of the 2000 Southern Ontario Seismic (SOS) project. *Geological Survey of Canada, Open File* 5056, 64 p.
 65. Palme, H., Janssens, M.-J., Takahashi, H., Anders, E., and Hertogen, J., 1978. Meteoritic material at five large impact craters. *Geochim. Cosmochim. Acta* 42, 313-323.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90184-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90184-9)
 66. Phinney, W.C., Dence, M.R., and Grieve, R.A.F., 1978. Investigation of the Manicouagan impact crater, Quebec: An introduction. *Journal of Geophysical Research* 83, 2729–2735.
<https://doi.org/10.1029/JB083iB06p02729>
 67. Reed, J.C., Wheler, J.O., Tucholke, B., 2005. Geologic map of North America. Decade of North American Geology. Continental Scale Map 001. Boulder, Geological Society of America, scale 1:5 000 000. <https://www.usgs.gov/media/images/geologic-map-north-america>
 68. Rivers, T. 1997. Lithotectonic elements of the Grenville province: review and tectonic implications. *Precambrian Research*, 86 (3-4), 117–154.
[http://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00038-7](http://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00038-7)
 69. Rivers, T. 2009. The Grenville Province as a large hot long-duration collisional orogen – insights from the spatial and thermal evolution of orogenic fronts. In: Ancient orogens and modern equivalents. J.B. Murphy, J.D. Keppie, and A. Hynes – eds. Geological Society, London, Special Publication 327, 407-446.
<https://doi.org/10.1144/SP327.17>
 70. Rivers, T., 2015. Tectonic Setting and Evolution of the Grenville Orogen: An assessment of progress over the last 40 years. *Geoscience Canada*, 42, 77-124. <http://dx.doi.org/10.12789/geocanj.2014.41.057>
 71. Rivers, T., Martignole, J., Gower, C.F., Davidson, A., 1989. New tectonic divisions of the Grenville Province, southeast Canadian shield. *Tectonics* 8, 63–84.
<http://doi.org/10.1029/TC008i001p00063>
 72. Rivers, T., Culshaw, N., Hynes, A., Indares, A., Jamieson, R., and Martignole, J., 2012. The Grenville orogen – A post-LITHOPROBE perspective. Chapter 3. In: Percival, J.A., Cook, F.A., Cloves, R.M. – Eds., 2012. *Tectonic styles in Canada: The LITHOPROBE perspective*. Geological Association of Canada Special Paper 49, 97-236.
 73. Rose, E.R., 1955. Manicouagan-Mushalagan Lake area, Québec. *Geological Survey of Canada Paper* 55–2 (Map with marginal notes).
 74. Scott, R.G., Grieve, R.A.F., and Pilkington, M., 1996. Petrographic and Rock Magnetic Study of the Central Magnetic Anomaly, Manicouagan Impact Structure, Canada. Abstracts of Papers Submitted to the Lunar and Planetary Science Conference 27, Part 3, Houston, USA, 1163-1164.
 75. Simonds, C.H., Floran, R.J., McGee, P.E., Phinney, W.C., and Warner, J.L., 1978. Petrogenesis of melt rocks, Manicouagan impact structure, Quebec. *J. Geophys. Res.* 83, 2773-2788.
<https://doi.org/10.1029/JB083iB06p02773>
 76. Spray, J.G., Thompson, L.M., 2008. Constraints on central uplift structure from the

- Manicouagan impact crater. *Meteorit. Planet. Sci.* 43, 2049–2057. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00660.x>
77. Spray, J.G., Thompson, L.M., Biren, M.B., O'Connell-Cooper, C., 2010. The Manicouagan impact structure as a terrestrial analogue site for lunar and martian planetary science. *Planetary and Space Science* 58, 538–551. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.09.010>
 78. Sweeney, J.F., 1978. Gravity study of great impact. *J. Geophys. Res.* 76, 5541–5551. <https://doi.org/10.1029/JB083iB06p02809>
 79. Taylor, S.R., 1982. Chapter 3. Meteorite Impacts, Craters and Multi-Ring Basins. In: *Planetary Science: A Lunar Perspective*. Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, 61–114.
 80. Therriault, A.M., Grieve, R.A.F., Reimold, W.U., 1997. Original size of the Vredefort Structure, implications for the geological evolution of the Witwatersrand Basin. *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 71–77. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01242.x>
 81. Toft, P.B., Scowen, P.A.H., Arkani-Hamed, J., Francis, D., 1993. Demagnetization by hydration in deep-crustal rocks in the Grenville province of Quebec, Canada: Implications for magnetic anomalies of continental collision zones. *Geology* 21, 999–1102. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0999:DBHIDC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0999:DBHIDC>2.3.CO;2)
 82. Tollo, R.B., Corriveau, L., McLelland, J., Bartholomew, M.J., 2004. Proterozoic tectonic evolution of the Grenville orogen in North America: An introduction. In: Tollo, R.B., Corriveau, L., McLelland, J., Bartholomew, M.J. (eds.). *Proterozoic tectonic evolution of the Grenville orogen in North America*. Geological Society of America Memoir 197, 1–18. <https://doi.org/10.1130/0-8137-1197-5.1>
 83. Ulmius, J., Andersson, J., and Möller, C., 2015. Hallandian 1.45 Ga high-temperature metamorphism in Baltica: P-T evolution and SIMS U-Pb zircon ages of aluminous gneisses, SW Sweden. *Precambrian Research* 265, 10–39. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.04.004>
 84. Van der Velden, A.J., and Cook, F.A., 2005. Relict subduction zones in Canada. *Journal of Geophysical Research* 110, B08403. <http://doi.org/10.1029/2004JB003333>
 85. Villeneuve, M.E., Ross, G.M., Parrish, R.R., Thériault, R.J., Miles, W., and Broome, J. 1993. Tectonic subdivision, U–Pb geochronology and Sm–Nd isotope geochemistry of the crystalline basement of the Western Canada Sedimentary Basin, Alberta and northeastern British Columbia. *Geological Survey of Canada, Bulletin* 447, 86 p. <https://doi.org/10.4095/77642>
 86. Wardle R.J., Rivers T., Gower C.F., Nunn G.A.G., Thomas A., 1986. The Northeastern Grenville province: new insights. In: J.M. Moore, A. Davidson, A.J. Baer – Eds. *The Grenville Province*. Geological Association of Canada Special Paper 31, 13–29.
 87. White, D.J., Forsyth, D.A., Asudeh, I., Carr, S.D., Wu, H., Easton, R.M., Mereu, R.F., 2000. A seismic-based cross-section of the Grenville Orogen in southern Ontario and western Quebec. *Can. J. Earth Sci.* 37, 183–192. <https://doi.org/10.1139/e99-094>
 88. Wood, C.A., Head, J.W., 1976. Comparison of impact basins on Mercury, Mars and the Moon, *Proc. Lunar Sci. Conf. 7th*, 3629–3651.
 89. Wynne-Edwards, H.R., 1972. The Grenville Province. In: Price, R.A., Douglas, R.J.W. – Eds. *Geological Association of Canada, Special Paper* 11, 263–334.
 90. Иванов Б.А., 2005. Моделирование крупнейших земных метеоритных кратеров. *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы* 39, 457–468. (Ivanov, B.A., 2005. Numerical Modeling of the Largest Terrestrial Meteorite Craters. *Solar System Research*, Vol. 39, No. 5, 2005, pp. 381–409. Translated from *Astronomicheskii Vestnik*, Vol. 39, No. 5, 2005, pp. 426–456). <https://doi.org/10.1007/s11208-005-0051-0>
 91. Минц М.В., 2011. Объемная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона, палеогеодинамические следствия // *Геотектоника* No. 4, 3–29 (Mints, M.V., 2011. 3D Model of Deep Structure of the Early Precambrian Crust in the East European Craton and Paleogeodynamic Implications. *Geotectonics* 45 (4), 267–290). <https://doi.org/10.1134/S0016852111040054>
 92. Минц М.В., 2016. Сейсмические образы коромантийной границы как отражение геодинамики докембрийского корообразования. *Геофизические исследования* 17 (1), 65–82. (Mints M.V., 2016. Seismic images of the crust-mantle boundary as an expression of geodynamics of the Precambrian crust formation. *Geophysical Research* 17 (1), 65–82 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gr2016.1-6>
 93. Минц М.В., 2017. Мезонеопротерозойский Гренвилл-Свеконорвежский внутриконтинентальный ороген: история, тектоника, геодинамика // *Геодинамика и тектонофизика* 8 (3), 619–642 (Mints M.V., 2017. Mesoneoproterozoic Grenville-Sveconorwegian intracontinental orogen: history, tectonics, geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (3), 619–642 (in Russian)). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0309>
 94. Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С., Белоусова Е.А., Блох Ю.И., Богина М.М., Буш В.А., Докукина К.А., Заможняя Н.Г., Злобин В.Л., Каулина Т.В., Конилов А.Н., Михайлов

В.О., Натапов Л.М., Пийп В.Б., Ступак В.М., Тихоцкий С.А., Трусов А.А., Филиппова И.Б., Шур Д.Ю., 2010. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. Москва Геокарт ГЕОС, Т. 2, 400 с. (Mints, M.V., Suleimanov, A.K., Babayants, P.S., Belousova, E.A., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A., Dokukina, K.A., Zamozhniaya, N.G., Zlobin, V.L., Kaulina, T.V., Konilov, A.N., Mikhailov, V.O., Nataпов, L.M., Piip, V.B., Stupak, V.M., Tihotsky, S.A., Trusov, A.A., Philippova I.B., Shur, D.Yu., Deep crustal structure, evolution and mineral deposits of the Early Precambrian basement of the East European Craton: interpretation of the data along the 1-EU Geotraverse, the 4B and

TATSEIS Profiles. Moscow, Geokart, GEOS, 2010. Vol. 2 - 400 p. (in Russian))

95. Минц М.В., Докукина К.А., Афонина Т.Б., 2020. 3D модель глубинного строения и палеопротерозойская эволюция Транс-Гудзонского орогена, Северная Америка, в сравнении с палеопротерозойскими орогенами Восточно-Европейского кратона // GeoScience – Науки о Земле, № 1, 4-26 (Mints, M.V., Dokukina, K.A., Afonina, T.B., 2020. A 3D model of the deep structure and Paleoproterozoic evolution of the Trans-Hudson orogen, North America, in comparison with the Paleoproterozoic orogens of the East European craton. GeoScience – Scientific Journal, No. 1, 4-26 (in Russian)). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43839459>



A REFLECTION SEISMIC-BASED 3D CRUSTAL-SCALE MODEL OF THE MANICOUAGAN IMPACT STRUCTURE, GRENVILLE PROVINCE, LITHOPROBE AG LINE 55

Mints M.V. ¹

Glaznev V.N. ²

Dokukina K.A. ¹

Muravina O.M. ²

Afonina T.B. ¹

¹ Geological institute GIN RAS, Moscow, Russia

² Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: dokukina@mail.ru

Abstract. *Astrobleme Manicouagan is one of the largest in the Earth's Precambrian rocks. The 3D model presented in the article integrates regional geological and geophysical data and geological interpretation of the seismic image of the crust and crustal-mantle boundary along the AG-55 reflection seismic profile of the LITHOPROBE program and demonstrates the main features of the astrobleme deep crustal structure. The meteorite crater is framed by ridge-shaped oval antiforms that alternate with oval and arcuate synforms. The maximum outer radius of the system of concentric zones of ~ 300 km indicates that the Manicouagan astrobleme belongs to the type of multi-ring basins known on the Moon, Mars, and Mercury. The asymmetry of the concentric zones indicates the oblique trajectory of the meteorite moving in the northwest direction. The idealized section of the lithosphere, including the Manicouagan astrobleme, contains four layers corresponding to the main structural-tectonic elements of the Grenville Orogen: allochthon – paraautochthon – lower crust – mantle. The allochthon and paraautochthon were subjected to the most intense impact. The rocks of the paraautochthon, plastically squeezed into the framing of the meteorite crater, formed concentric ridges (antiforms), while the rigid rocks of the allochthon survived from subsequent denudation in synformal depressions alternating with antiform structures. The upper plastic part of the lower crust was also squeezed out, forming antiform nuclei. The lower part of the lower crustal layer has no obvious signs of deformation. The depth of the crater in the AG-55 section is ~ 20 km, the maximum depth of the crater depression and deformation in the lower crust and crust-mantle boundary immediately below the crater remained uncharacterized. On the seismic section, the middle and lower crust of the Grenville Orogen in the area of the Manicouagan astrobleme are represented by a reflectivity zone 25-30 km thick. The smooth crustal-mantle boundary underlying the lower crust is only slightly disturbed. Similar images of the lower crust and crustal-mantle boundary that accompanied by the Large Igneous Provinces indicate the intra-continental provenance of the Grenville Orogen.*

Key words: *Manicouagan astrobleme, 3D geological-geophysical model, LITHOPROBE, Deep crustal structure, Crustal seismic images.*

© Коллектив авторов, 2022

ГЛУБИННАЯ И ДЕЗЮНКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЕВЛАХ-АГДЖЕБЕДИНСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ (АЗЕРБАЙДЖАН)

Асланов Б.С. ¹Худузаде А.И. ²Асланзаде Ф.Б. ³¹ Научно-исследовательский проектный институт нефти газа, Азербайджан² Производственное объединение "Азнефть", Азербайджан³ Азербайджанский государственный университет нефтяной промышленности, АзербайджанE-mail: beyler@inbox.ruE-mail: a.xuduzade@gmail.comE-mail: fidan.aslanzade@mail.ru

Аннотация: Геолого-геофизическими исследованиями, проведенными во второй половине прошлого века на северо-восточном борту Евлах-Агджабединского прогиба установлена нефтегазоносность глубокопогруженных мезозойских горизонтов Верхнего Мела, также неглубоко залегающих слоёв Палеогена и Миоцена. Нефтегазоносные продуктивные толщи выявлены в пределах структур Мурадханлы, Зардаб, Шыхбаги и Джафарли, которые включаются в Зардаб-Мурадханлы-Джафарлинский тектонический пояс. Нефтегазовые резервуары литологически связаны в основном, с трещиноватыми эффузивными и карбонатными породами Верхнего Мела, а также осадочно-вулканогенными породами Среднего Эоцена, и частично терригенными коллекторами Майкопа-Чокрака, относящие к пластово-сводовым типам ловушек. Рядом исследователей был сделан вывод о том, что при наличии благоприятных геологических условий на северо-восточном борту прогиба, коллекторы мезозойских отложений тоже могут содержать промышленные залежи нефти и газа. Исходя из этого, за последние годы, основной объем поисково-разведочного бурения и разведочной геофизики был сконцентрирован в пределах Евлах-Агджабединского прогиба, где наряду с палеоген-миоценовыми отложениями, мезозойские структуры тоже имеют широкое развитие. Результатами этих работ было уточнено глубинное структурно-тектоническое строение и нефтегазоносность, как на юго-западном, так и на северо-восточном склонах прогиба. Выяснено, что с точки зрения углеводородной насыщенности северо-западный и юго-восточный склоны резко отличается между собой, как в структурно-тектоническом отношении, так и в нефтегазоносности, возможно связанной разными циклами складчатости кайнозойской и мезозойской эр.

Ключевые слова: мел, тектоника, вулкан, эффузивные породы, майкоп, чокрак, мезокайнозой, стратиграфия, литология.

1. Введение

Первый промышленный приток нефти из мезозойских отложений был получен в 1940 году из альбских песчаников Нижнего Мела на площади Шурабад Прикаспийско-Губинского нефтегазоносного района. После этого ос2.нов-ной объем поискового бурения на мезозойские отложения был сконцентрирован на площадях этого района. Несмотря на то, что на некоторых площадях в процессе бурения и опробования были отмечены нефтегазопроявления и слабые притоки нефти и газа, поисковые работы не увенчались успехом, за исключением Сиазанской моноклинали (пл. Заглы-Зейва, Амирханлы, Чандагар, Сиазань, Нардаран и Саадан). Здесь было выявлено мелкое месторождение в карбонатном разрезе Верхнего Мела.

После этого поисковые и разведочные работы были передислоцированы с восточных нефтегазоносных районов Азербайджана в его западные части, в том числе Евлах-Агджабединскую впадину. В результате проведенного здесь глубокого бурения, из карбонатных и эффузивных пород Верхнего Мела получены промышленные притоки нефти на площадях Мурадханлы, Зардаб, Советляр и др. Положительные результаты бурения в меловых отложениях на указанных площадях вновь вызвали интерес геологов-нефтяников к нефтегазоносности мезозойских отложений в республике.

Так, почти 98% углеводородных ресурсов мезозоя по настоящее время остается не освоенными. Низкая эффективность поисково-разведочных работ на

нефть и газ в Мезозое, с одной стороны связана со сложным геологическим строением отложений Мезозоя, недостаточным объемом и качеством региональных геолого-геофизических (особенно сейсмических) работ, низким уровнем подготовленных под поисковое бурение перспективных структур, и с другой стороны с низким уровнем техники и технологии бурения, не доведением поисково-разведочных скважин до проектных глубин и горизонтов, низким качеством вскрытия и освоения нефтегазоносных объектов в скважинах.

Мезозойские отложения широко распространены на территории суши Азербайджана и максимальная мощность их в депрессионных зонах достигает 8-10 км. Эти отложения также как плиоценовые и палеоген-миоценовые образования Кайнозоя являются основными направлениями поисково-разведочных работ на нефть и газ в Азербайджане. Ввиду достаточного освоения ресурсов Продуктивной Толщи (ПТ) Плиоцена и отсутствия мощных пластов-коллекторов в разрезе Миоцен-Палеогена, потенциальными объектами для приращения промышленных запасов нефти и газа в Азербайджане считаются мезозойские отложения, т.е. меловые, юрские и триасовые резервуары. Поэтому проблемы поиска мезозойской нефти на территории страны всегда находились в центре внимания научных и производственных организаций республики.

Отметим, что по настоящее время на мезозойские отложения, за исключением месторождения Мурадханлы и Сизанской моноклинали было пробурено 230 глубоких скважин на территории суши Азербайджана. Но из указанного количества 112 скважин, не вскрывшие мезозойские отложения, были ликвидированы по техническим причинам, или же не были доведены до проектных горизонтов Мезозоя. Поэтому степень разведанности мезозойских отложений также совершенно недостаточна. Сейсморазведочные работы, проводимые во

второй половине XX и в начале XXI веков были ориентированы на изучение отложений Кайнозоя. Несмотря на выявление мелких месторождений и наличие промышленных притоков нефти и газа в меловых и среднеюрских образованиях на отдельных площадях Азербайджана, до настоящего времени задача поиска мезозойской нефти остается не решенной. Следует признаться, что запасы традиционных залежей углеводородов в Евлах-Агджабединском нефтегазоносном районе тоже практически истощены [1÷7]. Поэтому очень своевременной и важной является постановка вопроса о проведении работ по изучению путей миграции и эмиграции углеводородов и формирования залежей в глубоких слоях Евлах-Агджабединского прогиба. Тем более, наличие в разрезе Майкопа мощной глинистой толщи ещё раз подтверждает постановку и проведение глубинного исследования как актуальную. Результаты подобных исследований в будущем могут использоваться в качестве одного из критериев при оценке перспектив скоплений УВ в глубинных слоях Евлах-Агджабединского прогиба.

Геолого-геофизическими исследованиями, проведенными во второй половине прошлого века на северо-восточном борту Евлах-Агджабединского прогиба установлена нефтегазоносность глубоководных мезозойских горизонтов Верхнего Мела и Средней Юры. Рядом исследователей был сделан вывод о том, что при наличии благоприятных геологических условий на северо-восточном и юго-западном бортах прогиба, коллекторы мезозойских отложений тоже могут содержать промышленные залежи нефти и газа [1÷7]. Данная статья посвящена анализу нефтегазовых резервуаров Верхнего Мела, а также вулканогенно-магматических пород глубоких слоёв.

2. Результаты

Перспективы нефтегазоносности верхнеюрских и верхнемеловых

терригенно-карбонатных отложений предполагаются на ЮЗ борту впадины [1÷12], где они имеют благоприятные геолого-геохимические условия для накопления нефтематеринских пород и преобразования их в углеводороды в глинисто-карбонатных нефтепроизводящих отложениях. В отношении перспективности, как зоны нефтегазонакопления, отличаются Гёдекбоз-Ширванлы-Советлярский и Амирарх-Зардаб-Мурадханлинский пояса поднятий, особенно их, соответственно северо-восточные и юго-западные крылья, обращенные к глубокой части впадины.

По определению ряда исследователей [1, 3] Евлах-Агджабединский прогиб, расположенный в юго-восточной части Средне-Куринской депрессии на территории Азербайджана, характерен овалобразной формой, вытянутой в СЗ-ЮВ направлении. В географическом отношении он расположен между горами Малого Кавказа и правобережья р.Куры, а в тектоническом отношении между Гянджинской моноклиной и Мингечаур-Гёкчайской погруженной антиклинальной зоной третьей степени. В центральной части глубина поверхности кристаллического фундамента оценивается до 15 км (Керимов К.М.). На северо-западе прогиб отделяется от Газахской депрессии Шемкирским выступом, на юго-востоке ограничивается так называемым, Южно-Аразским глубинным разломом. В регионально-тектоническом отношении прогиб расположен на северо-восточном погружении Мало кавказского мегантиклинория. В пределах прогиба, по результатам геолого-геофизических исследований, выделены три структурных яруса: Мезозой, Палеоген и Неоген-Антропоген [2].

Результаты комплексного анализа основных критериев нефтегазонакопления показывают, что центральная зона Евлах-Агджабединского прогиба в мезокайнозойское время испытывала устойчивое и длительное прогибание, что привело к интенсивному

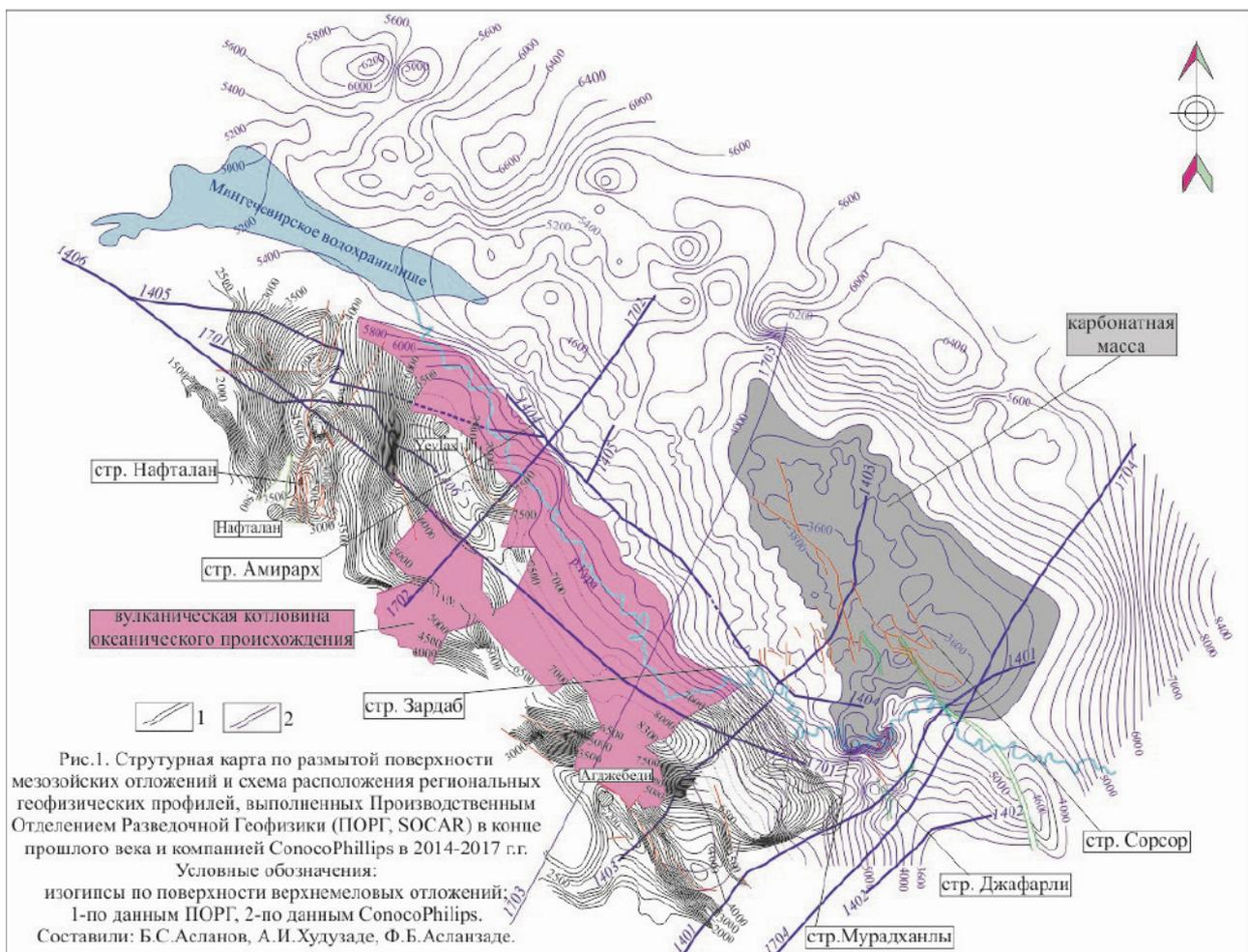
накоплению в указанной зоне мощных карбонатных и глинистых образований с богатым содержанием органического вещества. Следовательно, центральная часть прогиба являлась вероятной зоной нефтегазообразования, откуда углеводороды, мигрирующие также в северо-восточном направлении, заполняли резервуары уже существующих ловушек мезокайнозой литостратиграфического и сводового типов. Наиболее благоприятные геологические условия здесь, в это время, с точки зрения зоны нефтегазонакопления, занимала погруженная часть юго-западного крыла Зардаб-Мурадханлы-Джафарлинской антиклинального пояса [4÷7].

Можно допустить, что трещиноватые эффузивные породы верхнего мела в сводовой части поднятия Мурадханлы заполнены углеводородами в результате латеральной (боковой) миграции, т.е. перетока нефти и газа из резервуаров эоцена и миоцена на его юго-западное крыло по зонам трещин и выветривания вулканогенных пород.

Начиная с 90^х годов прошлого века по настоящее время, результаты геофизико-разведочных и поисково-скважинных работ определили резкое изменение в структурно-тектонической архитектуре глубинных недр Земной коры Евлах-Агджабединской впадины. Если по Антропоген-Плиоценовым отложениям наблюдается моноклиальная складчатость, углублённая в северо-восточном направлении, то сейсмо-гравиметрическими исследованиями в Миоцен-Палеогеновых отложениях выявлены антиклинальные пояса в направлении с северо-запада на юго-восток. В то же время, глубинные мезозойские структуры, погребённые под кайнозойскими отложениями, характеризуются более сложной тектоникой, так же, сеть тектонических разломов разных направлений и высоких амплитуд, резко отличает северо-западный борт от юго-восточного борта Евлах-Агджабединской впадины.

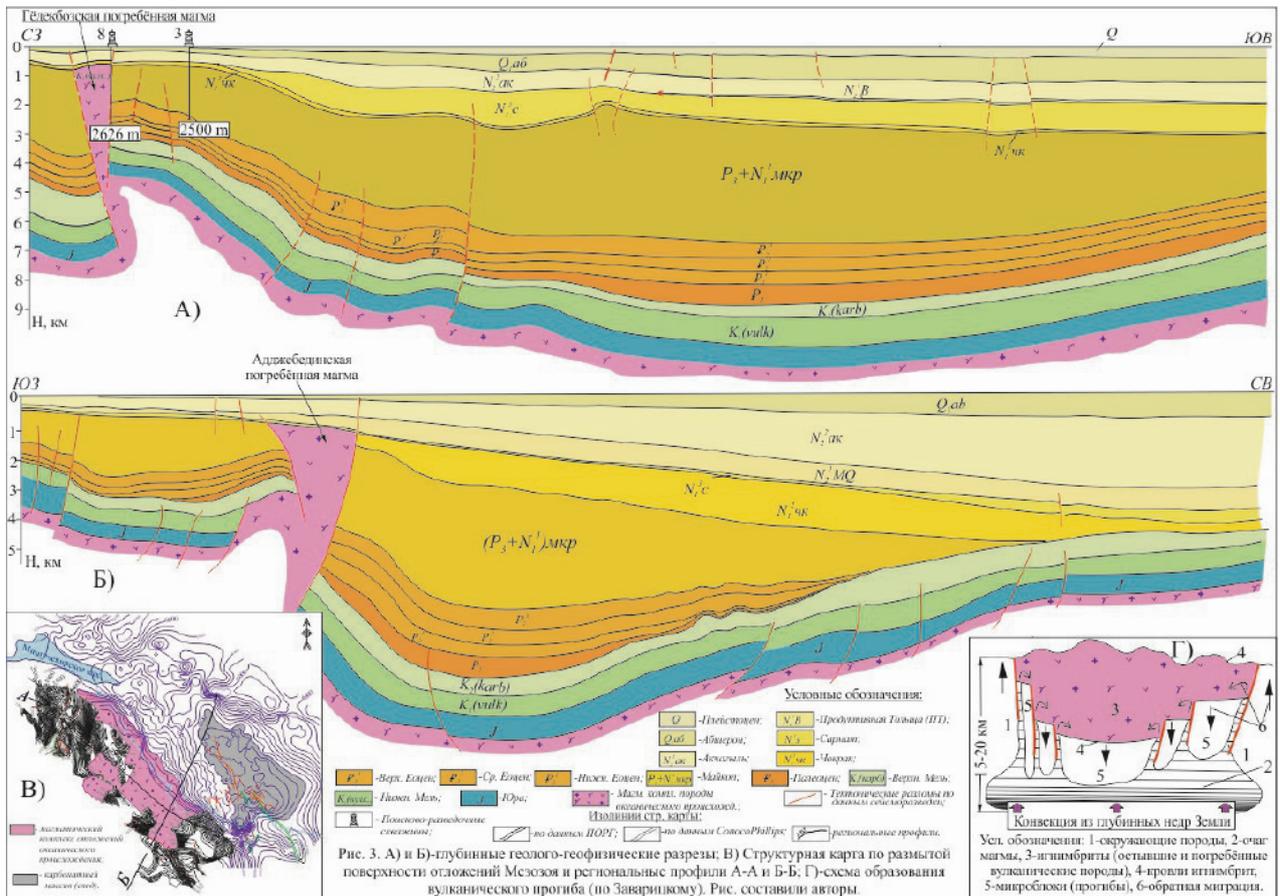
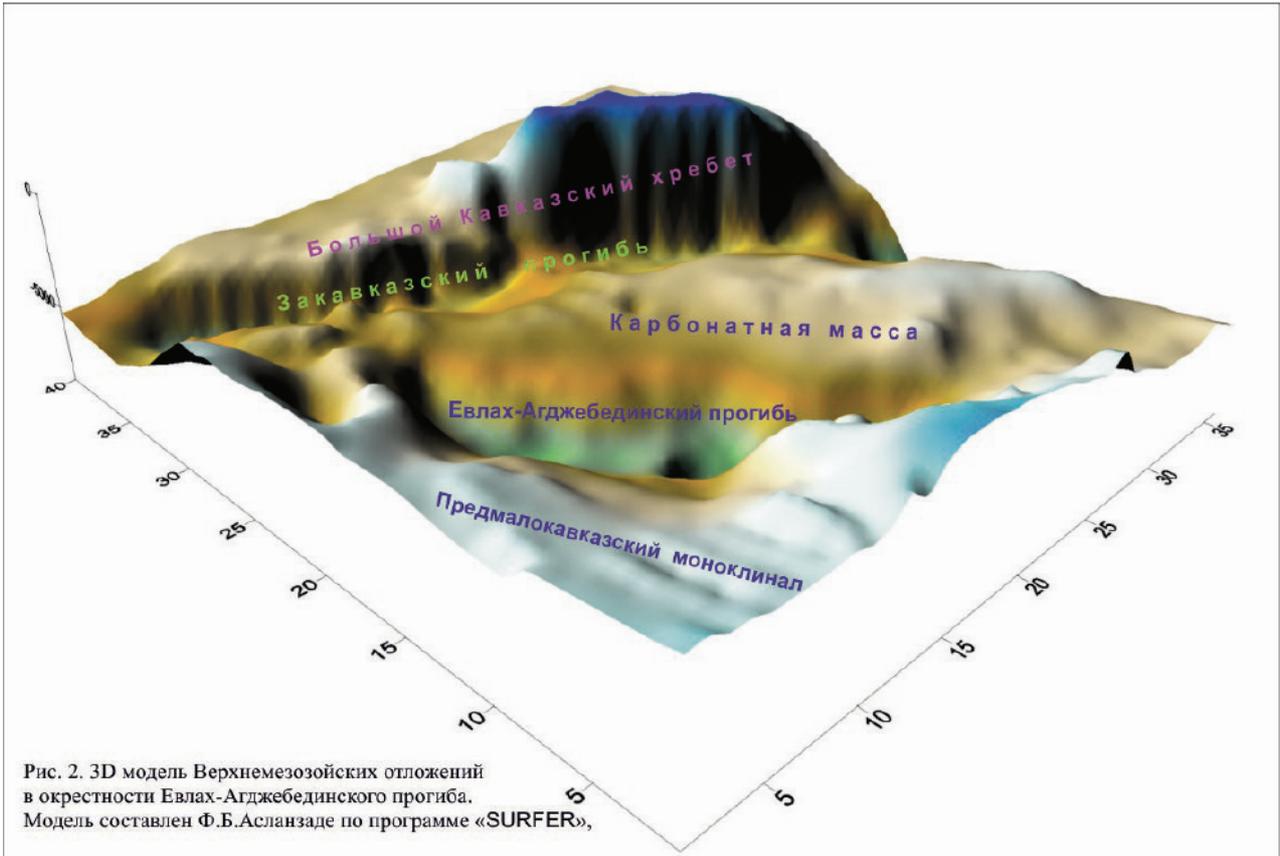
В 2014 году со стороны фирмы ConocoPhillips были переобработаны материалы сейсморазведки, выполненной трестом "Азернефтегеофизика" (ныне Производственное Отделение Разведочной Геофизики (ПОРГ) в течение последних лет и построена структурная карта, приуроченная к размытой поверхности верхнемеловых отложений по левобережью реки Куры и северо-восточному склону Евлах-Агджабединского прогиба. Справедливости ради, надо отметить, что работы фирмы ConocoPhillips меньше всего охватили крайнюю северо-

восточную часть Евлах-Агджабединского прогиба и между изогипсами фирмы ConocoPhillips и ОПРГ наблюдается значительное расхождение. На структурной карте, построенной фирмой ConocoPhillips, северо-восточный склон Евлах-Агджабединского прогиба представлен моноклиналью, погруженной в юго-западном направлении до глубин 8000 м. А в районе структуры Сор-Сор вырисовывается сложно-построенное сводовое поднятие, оконтуренное изогипсой 4000 м (рис. 1 и 2).



Литологический состав этого поднятия остается не выясненным до конца, но судя по скважинным данным, вскрытым на этих глубинах карбонатного комплекса верхнемеловых отложений, можно предположить, что литологический состав свода состоит из карбонатных пород.

По результатам комплексных сейсмо-гравиметрических разведочных работ, выполненных по региональным профилям ОПРГ в 2015-2017 годах, выявлены ярко выраженные сейсмические горизонты, приуроченные к поверхностям юрских и меловых отложений (рис. 3).



Образование и формирование предполагаемой карбонатной платформы можно предположить вкратце следующим образом: – в конце Мезозойской эры (Верхний Мел) исследуемый регион представлял собой окраинную территорию Палеоокеана Тетис (рис. 4).

Лабораторией "Геолого-геофизическое обобщение" (НИПИ "Нефтегаз",

SOCAR), выполнен комплексный анализ и интерпретация, целью которой являлось уточнение глубинного строения Евлах-Агджабединского прогиба по выделенным сейсмическим горизонтам ОПРГ, также обоснование перспективных направлений поисково-разведочных работ на нефть и газ.

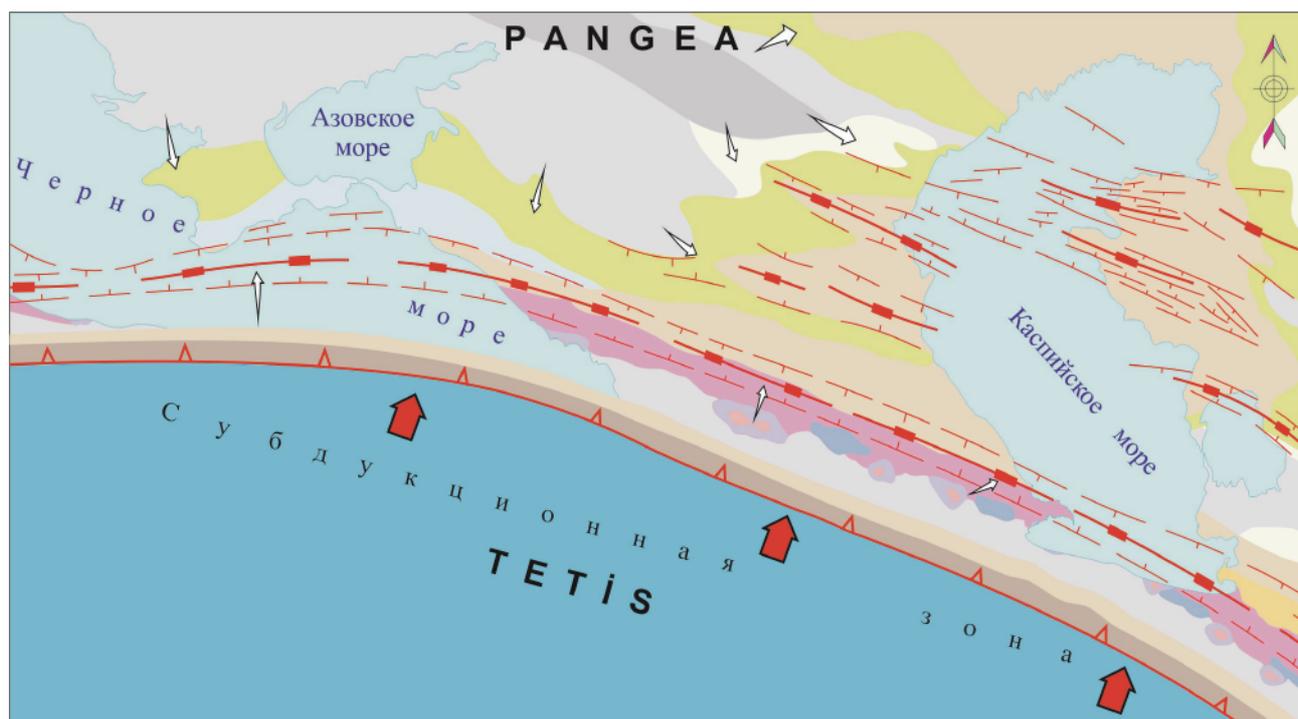


Рис.4. История геологического развития Евлах-Агджабединского прогиба в Палеозой-Мезозойской времени (Барьер Е., Врильеник Б., Брунет М.-Ф., Мамедов П.З. и др.)

Тектонические единицы:	Циклы складчатости:	Условные обозначения:	Отложения:
- вулканы и вулканические обломки континентального типа;	- тектонический меланж;	- платформа терригенных отложений (морская фация - мелко и крупно зернистые);	- низменность поймы (морская прибрежная)/прибрежный шельф/транзитная зона;
- палеостресс (режим расширения);	- равнина смывания;	- карбонаты эвапоритов/кластические шельфы (транзитная зона);	- отложения глубоководных бассейнов;
- активная зона субдукции;	- обломки прибрежных отложений (прибрежный шельфовый бассейн);	- морские вулканиты типа мелководье;	- современный контур бассейна;
- активная зона тектонического расширения;	- равнина алювиальных осадков);		
- разрывы типа сброса;	- активная (континентальная) горная складчатости;		
- направления перенесения осадков;	- рифовые платформы - карбонатные образования (шельф. платформа мелководье);		

Наряду с этим, проанализировано палеогеологическое формирование и структурно-тектоническая особенность отложений мезо-кайнозой, оценена мощность разновозрастных комплексных масс, выделены и определены границы крупных тектонических блоков.

Было подтверждено, что отложения Мела и Юры в глубокой части прогиба, наряду с испытанием резкой дислокации, представлены вулканогенно-

терригенными и карбонатными породами. Глубинная тектоника, состоящая из блоков, также характеризуется дизъюнктивной дислокацией разных направлений и глубин проникновения разрывных нарушений. В то же время, залегание Нижне-, Средне- и Верхнеэоценовых отложений непосредственно на верхнемеловых отложениях и сравнение Евлах-Агджабединской впадины с микробассейном, образованном в Эоцен-

Майкопское время, позволяет предположить, что в конце майкопское время в мезозойских осадочных формациях, образование углеводородов было полностью прекращено и происходила эмиграция материалов УВ. Анализ мощностей разновозрастных слоёв по профильным разрезам позволяет предположить, что после майкопского периода произошло горизонтальное смещение мезозойских и миоценовых бассейнов. Это было связано с изменением палеогеологических и палеогеографических условий. А с восстановлением прежних условий в миоценовых бассейнах осадконакопления Евлах-Агджабединской впадины процесс нефтегазообразования возродился заново, но с другим темпом и активизацией.

Для объяснения вышеотмеченного, вкратце проанализируем структурно-тектонические особенности Евлах-Агджабединской впадины по глубинным геолого-геофизическим разрезам и трехмерной геологической моделью 3Д (рис. 2).

Судя по глубинному геолого-геофизическому разрезу вдоль продольного профиля А-А (рис. 3, А), в районе структуры Гёдекбоз вулканогенно-магматические породы в погребенном виде залегают на глубине около 500-700 м и форма залегание этих пород напоминает "конусообразную" постройку. По данным скважины 3 и 8, отложения Чокрака и Акчагыла непосредственно залегают на этих породах. Углубление вулканогенно-магматических пород в районе поднятия Барда доходит до 10 км. По другим продольным профилям вулканогенно-магматические породы в погребенном виде залегают в районе поднятия Ширингум (скв. 2) 4000 м, в районе поднятия Мурадханлы (скв. 3) 3000 м, и в районе поднятия Сор-Сор 5000 м. В районе поднятия Ширингум и в районе поднятия Мурадханлы, модель 2D вулканогенных пород также напоминает вулканогенно-магматическое сооружение. На поднятии Мурадханлы отложения Чокрака и Акчагыла

тоже непосредственно залегают на вулканогенных породах, но в районе поднятия Ширингум на вулканогенно-магматических породах непосредственно залегают отложения Плиоцена.

На поперечном глубинном разрезе по профилю Б-Б (рис. 3, Б,) аналогичная картина глубинного структурно-тектонического строения Евлах-Агджабединского прогиба идентичная. Но явное сходство, т.е. вулканогенно-магматическое извержение, наблюдается в районе поднятия Гёдекбоз (рис. 3, А) и Агджабеди (рис. 3, Б). Как известно, поднятие Гёдекбоз расположено на северо-западной, а поднятие Агджабеди на юго-восточной прибортовых частях Евлах-Агджабединского прогиба, но 2D модель вулканогенно-магматического конуса очень схожий. В то же время, по мнению ряда исследователей [1÷7], северо-западный и юго-восточный прибортовые части Евлах-Агджабединского прогиба в кайнозойском структурном плане резко отличаются (рис. 1 и 3, В). Сравнивая на глубинных разрезах картины вулканогенно-магматического конуса в районе поднятий Гёдекбоз (рис. 3, А) и Агджабеди (рис.3, Б), ещё раз убедись в том, что резкое отличие северо-западного и юго-восточного прибортовых частей Евлах-Агджабединского прогиба относится к кайнозойским отложениям, а структура мезозойских отложений идентичная по всему акваторию прогиба, представлена интрузивными породами, предположительно относящихся к океанической вулканической котловине (см. рис. 1 и 2 В).

3. Заключение

Таким образом, в результате анализа региональных геолого-геофизических разрезов, обоснован совершенно новый подход к глубинным тектоническим особенностям Евлах-Агджабединской впадины:

- уточнено расположение предполагаемой океанической вулканической

котловины, образованной в мезозойское время и являющейся окраинной активной частью океана Палео-Тетис;

- можно предположить, что центральная часть Евлах-Агджабединской впадины напоминает складчатость рифтового строения океана Палеотетис;
- начиная с Майкопской эры, нефтегазообразующие бассейны Кайнозой сместились по горизонтальной плоскости по отношению к Мезозойским бассейнам на юго-восточном направлении (в сторону Южного Каспия);
- для уточнения о глубинном рифтовом строении Евлах-Агджабединской впадины, смещении депоцентров структурно-формационных комплексов, вулканогенно-магматическом основании осадочного чехла продолжить комплексные геофизические исследования на региональных профилях в плотной сети, позволяющих построению карт в масштабе 1:200 000;
- рекомендовать перед ОПРГ (SOCAR) проведению сейсмических работ на мезозойский комплекс с учетом результатов нефтегазовых проектов по Черному и Каспийскому морям.
- при уточнении перспективных направлений поисково-разведочных работ на нефть и газ, необходимо изучить геодинамические циклы изучаемого региона.

Литература / Reference

1. Гусейнов А.Н., Ширинов Ф.А., 1977. Нефтегеологическое районирование

территории Азербайджана // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство, Баку, № 8, с. 5-10.

2. Керимов И.А., Мамедов С.Б., Эфендиев Д.И., 1989. Структурно-тектонические условия формирования зон нефтегазоаккумуляции в глубокозалегающих мезозойских отложениях Евлах-Агджабединского прогиба // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство, Баку, № 4. с.12-17.
3. Салманов А.М., Юсифов Х.М., 2013. К перспективам нефтегазоносности северо-восточного борта Евлах-Агджабединского прогиба // Научные Труды НИПИ «НефтеГаз», Баку, № 2, с.6-12.
4. Юсифзаде Х.Б., 1987. Нефтегазогелогическое районирование и рациональный комплекс поисково-разведочных работ в Азербайджане // "Геология нефти и газа", Москва, № 3, с.6-16.
5. Юсифов Х.М., Сулейманов А.М., 1993. К вопросу нефтегеологического районирования территории Азербайджана по мезозойскому нефтегазоносному комплексу // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство, Баку, № 4, с.3-12.
6. Юсифов Х.М., Рахманов Р.Р., 2011. Стратегия поиска мезозойской нефти в Азербайджане // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство, Баку, № 6-7, с.10-18.
7. Юсифов Х.М., 2012. Основные критерии нефтегазоносности мезозойских отложений Азербайджана // Научные Труды НИПИ «НефтеГаз» Баку, № 2, с.6-14



DEPTH AND DISJUNCTIVE TECTONICS OF THE MESOZOIC SEDIMENTS OF THE EVLAKH-AGDZHEBEDI OIL AND GAS-BEARING AREA ACCORDING TO GEOPHYSICAL DATA (AZERBAIJAN)

Aslanov B.S. ¹

Khuduzadeh A.I. ²

Aslanzade F.B. ³

¹ Oil Gas Scientific Research Project Institute, SOCAR

² Azneft Production Association, SOCAR

³ Azerbaijan State University of Oil and Industry

E-mail: beyler@inbox.ru

E-mail: a.xuduzade@gmail.com

E-mail: fidan_aslanzade@mail.ru

Abstract: Geological and geophysical studies taken part in the second half of the last century on the north-east of the Yevlakh-Agdzhabedy trough, established the oil and gas potential of the deeply submerged Mesozoic horizons in early Cretaceous sediments. Also in shallow horizons of the Paleogene and Miocene deposits. Oil and gas productive horizons are identified within the structures of Muradkhanli, Zardab, Shykhbagi and Jafarli, which are included in the Zardab-Muradkhanli-Jafarli tectonic belt. Oil and gas reservoirs are lithologically associated mainly with fractured volcanic and carbonate rocks of the Early Cretaceous, as well as volcano-sedimentary rocks of the Middle Eocene, and partially clastic reservoirs of Maykop-Chokrak, presented by stratigraphic traps. Many researchers agreed that the presence of favourable geological conditions on the north-east side of the trough creates the environment for industrial oil-and-gas-bearing zones in the Mesozoic deposits. Despite the fact that the deep-exploration drilling and geophysical survey has been concentrated within the Yevlakh-Agdzhabedy Depression zone, along the Paleogene-Miocene deposits, the Mesozoic sediments are also widely presented. The research clarified the deep structural and tectonics of oil and gas perspective zones, both on the south-west and north-east slopes of the trough. It was found out that the north-west and south-east slopes hydrocarbon potential differ, and structurally and tectonically possibly associated with different folding cycles of the Cenozoic and Mesozoic eras.

Keywords: chalk, tectonics, volcano, effusive rocks, maykop, chokrak, mesocenozoic, stratigraphy, lithology.

© Коллектив авторов, 2022



НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ЦИРКОН В МЕТАСОМАТИЗИРОВАННЫХ ГАРЦБУРГИТАХ ЭКЛОГИТОВОЙ АССОЦИАЦИИ САЛМА, БЕЛОМОРСКАЯ ЭКЛОГИТОВАЯ ПРОВИНЦИЯ

Докукина К.А. ¹Окина О.И. ¹Шешуков В.С. ¹Баянова Т.Б. ²Серов П.А. ²Пожиленко В.И. ²¹ Геологический институт ГИН РАН, Москва, Россия² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, РоссияE-mail: dokukina@mail.ru

Аннотация: Из метагарцбургитов эклогитовой ассоциации Салмы Беломорской эклогитовой провинции Фенноскандинавского щита были выделены цирконы палеопротерозойского и неопротерозойского возраста. Палеопротерозойский циркон представлен мелкими (20-150 мкм) округлыми бесцветными зернами однородными серыми или зональными в катодолюминесценции: серые зональные ядра окружены светло-серыми оторочками. Датировано только одно ядро раннепалеопротерозойского U-Pb возраста ~ 2.46 млрд лет. Светлые оторочки циркона имеют позднепалеопротерозойский возраст ~ 1.8-1.9 млрд лет. Коричневато-розовые угловатые обломки или зерна циркона, размером до 150-200 мкм в катодолюминесценции демонстрируют необычные структуры пламеневидного типа и дали субконкордантные значения неопротерозойского возраста ~ 900 млн лет. Неопротерозойский циркон характеризуется широкими вариациями по содержанию Th (57-1000 ppm), U (179-727 ppm), величины Th/U отношения (0.16-1.45) с преобладанием высоких значений >1. Циркон содержит большое количество P3Э (340-995 ppm) с высоким содержанием легких ($Lu_N/La_N = 19-1117$, $Lu_N/Sm_N = 5-52$), редкоземельные спектры имеют отрицательную европиевую и слабовыраженную, вплоть до полного исчезновения цериевую аномалию ($Ce/Ce^* = 0.9-8.2$). В цирконе присутствуют заметные содержания несовместимых элементов, петрогенных Fe, Ca, Sr и литофильных Ba, Rb, Sr. Точки составов циркона на дискриминационной диаграммах La vs Sm_N/La_N и Ce/Ce* тяготеют или лежат в поле цирконов гидротермального типа. Sm-Nd минеральная изохрона также свидетельствует об омоложенном неопротерозойском возрасте метагарцбургита – около 780 млн лет и перестройке изотопной самарий-неодимовой системы на уровне минералов под воздействием гидротермального процесса.

Ключевые слова: эклогиты, гарцбургиты, метасоматоз, гидротермальный циркон.

Введение

Тела эклогитов Беломорской эклогитовой провинции пространственно и структурно приурочены к активной окраине Кольского палеоконтинента и размещены в мигматизированных ТТГ гнейсах (рис. 1а). Протолит эклогитов Салмы представлял собой расслоенный комплекс переслаивающихся габбро, Fe-Ti габбро и габброноритов и был сформирован 2.9 млрд лет назад в процессе эволюции медленно-спредингового хребта, подобного современному Юго-Западному Индийскому хребту (Mints et al., 2014; 2015). В последние годы в составе эклогитовой ассоциации Салмы обнаружены эклогитизированные пиллоу-лавы первого слоя океанической коры и эклогитизированные метаосадки, сопоставимые с пелагическими мезоархейскими осадками

Водлозерско-Сегозерской зенокаменного пояса (Dokukina et al., 2020; Dokukina et al., 2017, 2021).

В процессе геологического картирования Енского сегмента Беломорской эклогитовой провинции В.И. Пожиленко среди гнейсов ТТГ состава было выявлено широкое распространение (около 80 участков) в разной степени регрессивно измененных реликтов архейских субдукционных эклогитов ассоциации Салмы; а также несколько десятков тел метаморфизованных ультрабазитов, залегающих среди протяженных пластовых тел амфиболитов, сформированным по эклогитам. Гипербазиты и эклогиты часто присутствуют в одних и тех же обнажениях и, судя по всему, генетически связаны (рис. 1b).

Целью данной работы было изучение циркона из метасоматизированных гарцбургитов входящих в состав разреза

экологитизированных пород на участке Узкая Салма.

Краткое геологическое описание

К настоящему времени установлено, что вдоль северо-восточной границы Беломорского аккреционного орогена размещены тела экологитов, сформированные в связи с мезо-неоархейской субдукцией, и неоархейские экологитизированные мафитовые дайки. Традиционно, во многих публикациях, эта область рассматривается в составе Беломорского подвижного пояса. Экологиты позволили кардинально пересмотреть существующие представления о северо-восточной границе Беломорского орогена. Стало ясно, что естественной

границей между архейскими тектоническими провинциями – Беломорским и Кольским коллизионно-аккреционными орогенами (соответственно, между их составляющими – Инари-Кольским и Хетоламбинским микроконтинентами) является Центрально-Беломорский зеленокаменный пояс. С учетом этого, мы отделили северную часть Хетоламбинского тектонического покрова, образованную преимущественно гранито-гнейсами, залегающую структурно выше Центрально-Беломорского зеленокаменного пояса, вывели ее из состава Беломорского орогена и рассматриваем в качестве Южно-Кольской активной окраины Инари-Кольского микроконтинента (рис. 1а).

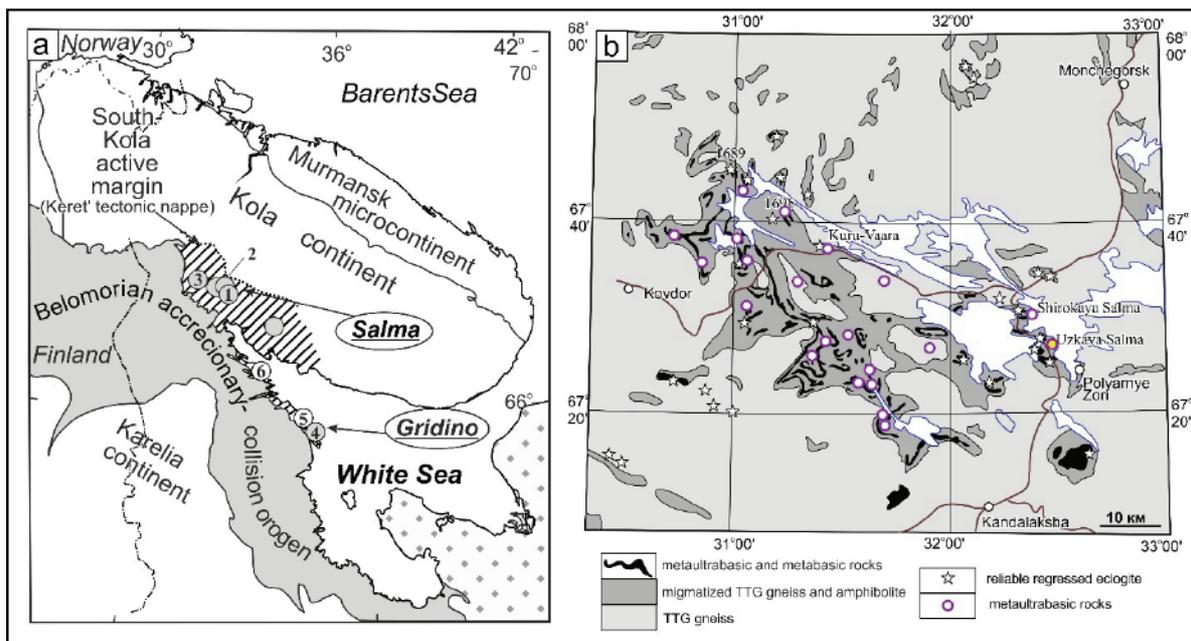


Рисунок 1. (а) Схематическая геологическая карта Фенноскандинавского щита и локализация экологитов (цифры в кружках по (Mints et al., 2010). Субдукционные экологиты: 1 – Широкая Салма, 2 – Узкая Салма, 3 – Чалма (карьер Куру-Ваара), 4 – остров Столбиха; экологиты, связанные с коллизией: 5 – дайковый рой Гридино, 6 – Красная губа. (б) Схематическая геологическая карта, где показаны известные экологитовые тела и тела ультрабазитов.

Figure 1. (a) Schematic geological map of the Fennoscandian Shield and eclogite localities there (numbers in circles). Modified after Mints et al. (2010a). Subduction-related eclogite: 1, Shirokaya Salma; 2, Uzskaya Salma; 3, Chalma (Kuru-Vaara quarry); 4, Stolbikha Island; collision-related eclogite: 5, Gridino dyke swarm; 6, Krasnaya Bay. (b) Geological sketch map of locations, where the known Salma eclogite and ultrabasic bodies are shown.

Гранито-гнейсы активной окраины тектонически перекрывают Центрально-Беломорский зеленокаменный пояс и пассивную окраину Хетоламбинского микроконтинента. В этом

контексте Центрально-Беломорский пояс рассматривается в качестве мезо-неоархейской сутурной зоны. В более широком контексте протяженную область, включающую пассивную окраину

Хетоламбинского микроконтинента, сутурную зону и активную окраину Инари-Кольского микроконтинента, образованную ТТГ-гнейсами и включающую эклогиты обоих типов (субдукционные эклогиты и эклогитизированные дайки) мы рассматриваем в качестве Беломорской мезо-неоархейской эклогитовой провинции (рис. 1а). В соответствии с пространственным размещением эклогитов выделяются две эклогитовые ассоциации: Салмы (ТТГ гнейсы и субдукционные эклогиты) и Гридино (ТТГ гнейсы, тектонический меланж, субдукционные эклогиты и эклогитизированные мафитовые дайки, интрузивные тела метагаббро) (Mints et al., 2014; 2015).

Эклогитовый метаморфизм всех пород Беломорской эклогитовой провинции был не позднее 2.7 млрд лет назад, а вероятнее всего в интервале 2.82-2.74 млрд лет назад (Dokukina et al., 2012; Dokukina et al., 2014; Mints et al., 2014; 2015). В регионе установлено не менее трех наложенных высокотемпературных событий плюмового генезиса с возрастными 2.72-2.70, 2.4-2.5 и 1.9 млрд лет (Mints et al., 2014; 2015).

Оценке мезо-неоархейского возраста метаморфизма эклогитовой фации в БЭП (Mints et al., 2010, 2014, 2015; Dokukina et al., 2011, 2012, 2014; Konilov et al., 2011) противопоставлена модель, утверждающая поздне-палеопротерозойский возраст этого события (Skublov et al., 2011a, 2011b; Mel'nik et al., 2013; Li et al., 2017; Imayama et al., 2017; Yu et al., 2018). Критика модели позднепалеопротерозойского возраста эклогитового метаморфизма в БЭП приведена в работе (Dokukina, Mints, 2019, Mints, Dokukina, 2020).

Узкая Салма

Несколько крупных эклогитовых тел, которые обнажаются вдоль южного берега пролива Узкая Салма на озере Имандра и вкрест простираются пересекается федеральной автотрассой Санкт-Петербург – Мурманск (1192-й

километр). Эклогиты прослежены по простирацию вдоль берега оз. Имандра примерно на 4 км при суммарной мощности 300-500 м. На существующих геологических картах эти эклогиты включены в комплекс неоархейских амфиболитов, в том числе, гранатовых (Pozhilenko et al., 2002 и ссылки там же).

Эклогитовая ассоциация вскрыта в северо-восточном борту автотрассы. В ТТГ гнейсах распределены тела симплектитовых мафитовых эклогитов, прослой и линзы «ржавых» эклогитов, обогащенных Fe-Ti окислами, гранатовых пироксенитов и метагипербазитов, маломощные прослой и уплощенные линзы гранатитов, тела гранатовых и безгранатовых амфиболитов, а также жилообразные и линзовидные тела адakitовых гранитоидов и палеопротерозойских пегматитов. Полосчатость гнейсов характеризуется восток-северо-восточным простираем и крутым северо-северо-западным падением. Границы эклогитов и гранитоидов с вмещающими ТТГ гнейсами – субсогласные.

С телами эклогитов, которые по химизму преимущественно соответствуют толеитовым базальтам или габбро, часто ассоциируют высокомагнезиальные разности – гранатовые пироксениты и шпинелевые гарцбургиты (метагипербазиты). Эта работа посвящена исследованию циркона, извлеченного из шпинелевых гарцбургитов Узкой Салмы.

Методы

Монофракции минералов были выделены в ГИ КНЦ РАН (Апатиты) и ГИН РАН (Москва).

U-Pb датирование единичных зерен («single grain») цирконов выполнено в ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты) с использованием смешанного $^{205}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ трассера на масс-спектрометре Finnigan-MAT-262 в статическом режиме на коллекторах. Краткая методика изложена в (Вауанова et al., 2007). Ошибка воспроизводимости U/Pb отношений - 0.5%.

U-Th-Pb локальное изотопное датирование цирконов методом LA-ICP-MS выполнено в лаборатории химико-аналитических исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института РАН, г. Москва. Для лазерного отбора пробы использовалась система лазерной абляции NWR-213 (Electro Scientific Ind.), совмещенная с магнито-секторным ICP масс-спектрометром повышенного разрешения Element2 (Thermo Scientific Inc.). Непосредственно перед измерением шашки с цирконами промывались в ультразвуковой ванне в 5 % растворе HNO_3 , затем споласкивались в дистиллированной воде и сушились на воздухе. Перенос испаренного лазером вещества осуществлялся потоком гелия с последующим подмешиванием к нему газифицированного аргона. Для снижения уровня газового фона и повышения стабильности аналитического сигнала применялась тонкая фильтрация и перемешивание газовых потоков. Калибровка производилась по внешнему стандарту с использованием циркона GJ-1. Качество анализа оценивалось путем одновременного измерения неизвестных образцов и контрольных стандартов циркона 91500 и Plesovice.

Обработка, коррекция и графическая иллюстрация данных U-Th-Pb изотопного анализа выполнялась в программах Glitter (Van Achterbergh et al., 2021), ComPbCorr (Anderson, 2002) и Isoplot (Ludwig, 2008).

Концентрации микроэлементов в цирконах определяли с использованием масс-спектрометра ЭЛЕМЕНТ2 (Thermo Fisher Scientific of GmbH, Германия) и системы лазерной абляции NWR-213: Nd-YAG, (ESI, USA). Абляция проводилась в точке с размером пятна 25 и 40 мкм и фактической плотностью энергии на поверхности образца около 4 J/cm². Транспортировку полученного аэрозоля пробы в плазму осуществляли с помощью гелия. Проводилось измерение

изотопов ³¹P, ⁴⁹Ti, ⁸⁸Sr, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ⁹³Nb, ¹³⁹La, ¹⁴⁰Ce, ¹⁴¹Pr, ¹⁴⁶Nd, ¹⁴⁷Sm, ¹⁵¹Eu, ¹⁵⁷Gd, ¹⁵⁹Tb, ¹⁶³Dy, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁷Er, ¹⁶⁹Tm, ¹⁷³Yb, ¹⁷⁵Lu, ¹⁷⁷Hf, ¹⁸¹Ta, ²⁰⁸Pb, ²³²Th и ²³⁸U. Для вычисления концентраций микроэлементов использовали циркон 91500 в качестве стандартного образца и Zr в качестве внутреннего стандарта. Расчет проводили с использованием программы Glitter (Van Achterbergh et al., 2021).

Sm-Nd датирование пород и минералов выполнено на масс-спектрометре Finningan MAT-262 (Апатиты).

Описание объектов исследования

Петрография и минералогия

Изученные ультраосновные породы представлены хлоритизированными и карбонтизированными (доломит и кальцит) гарцбургитами (рис. 2). Гарцбургиты имеют в своем составе оливин (#Mg 0.84-0.83), ортопироксен (#Mg 0.84-0.83), хромистая шпинель (#Mg 0.14-0.19, #Cr 0.50-0.51, TiO₂ 1.22-1.65 вес. %), доломит, серпентин с магнетитом, хлорит. В линейных областях проработки флюидом по породе развивается дендровидный агрегат клинопироксена и кальцит.

Геохимия

Гарцбургиты характеризуются наиболее высокой магнезиальностью (#Mg 0.84-0.89), относительно всех остальных основных и кислых пород в ассоциации эклогитов Салмы, высокими содержаниями MgO (до 34 вес. %), Cr (до 2300 ppm), Ni (до 2000 ppm), низкими содержаниями кремнезема (SiO₂ 35-46 вес. %), CaO (до 4 вес. %), TiO₂ (до 0.2 вес. %). В составе гарцбургитов присутствуют большие содержания H₂O+ (до 7 вес. %) и CO₂ (до 10 вес. %) (рис. 3). По содержанию малых и рассеянных элементов гарцбургиты характеризуются деплетированными составами с низкими содержаниями РЗЭ и обогащением в Rb, Ba, Sr, низкими содержаниями Zr и Hf, наличием положительной Sr аномалии, отрицательной Eu аномалией.

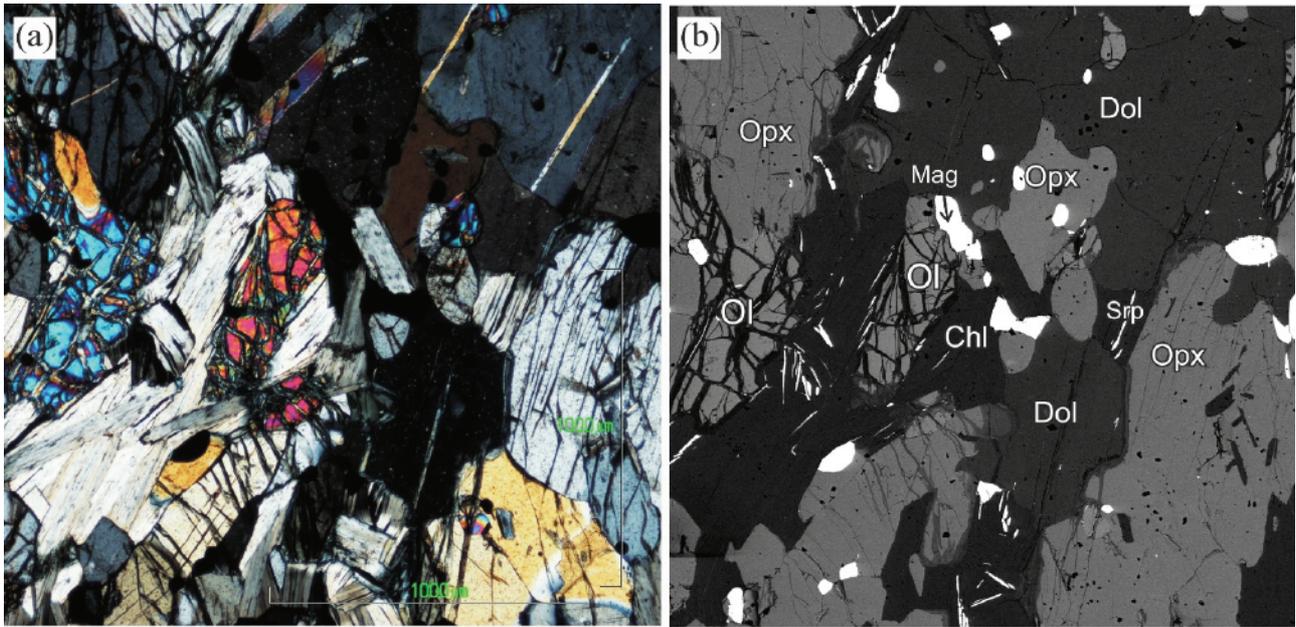


Рисунок 2. Микрофотография в скрещенных николях (a) и BSE изображение метагарцбургитов, образец s204/735, Узкая Салма. Аббревиатура минералов по Whitney & Evans (2010).

Figure 2. Cross polarized light photomicrograph (a) and BSE images of the metaharzburgite, sample s204/735. Mineral abbreviation after Whitney & Evans (2010).

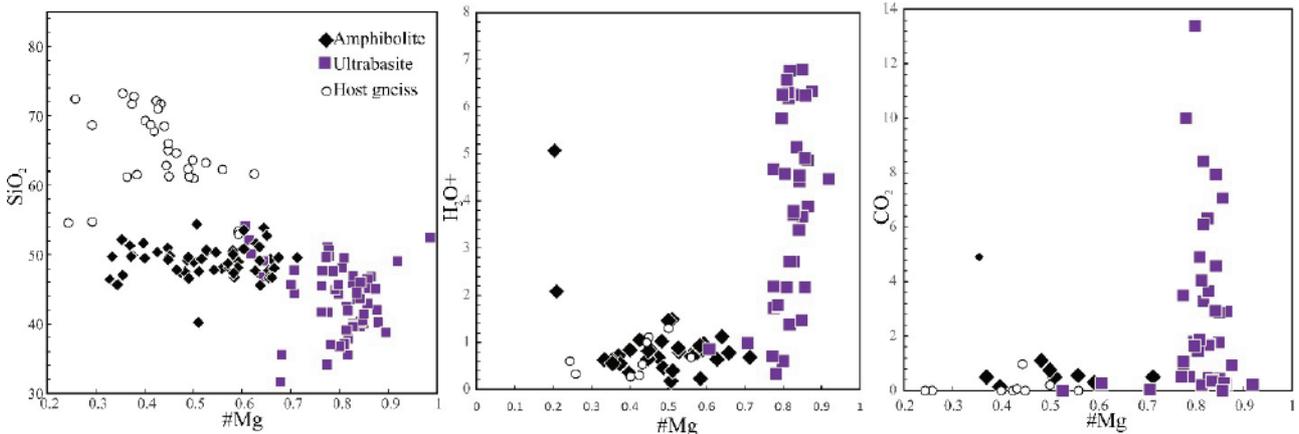


Рисунок 3. Композиционные диаграммы вмещающих гнейсов, эклогитов и гипербазитов в ассоциации эклогитов Салма (Енский зеленокаменный пояс).

Figure 3. Harker diagrams for the host gneiss, eclogite and ultrabasite rocks of the Salma eclogite association (Ena greenstone belt)

Геохронология

Из метагарцбургитов (проба s204y3-11) были выделены цирконы двух типов (рис. 4).

(1) Циркон первого типа представлен мелкими (20-150 мкм) округлыми бесцветными зернами однородными серыми или зональными в катодолюминесценции (CL): серые зональные ядра окружены светло-серыми оторочками. Цирконы содержат включения апатита, хлорита, доломита, корунда, ортопироксена.

Датирование единичного циркона методом ID-TIMS дало конкордантное палеопротерозойское значение возраста 2320 ± 3 млн лет (рис. 5).

(1.1) Ядра цирконов очень мелкие, поэтому методом LA-ICPMS удалось получить только одно раннепалеопротерозойское значение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста 2460 млн лет (рис. 6).

(1.2) Остальные измерения методом LA-ICPMS циркона данного типа дали возрасты ~1.8-1.9 млрд лет (рис. 6).

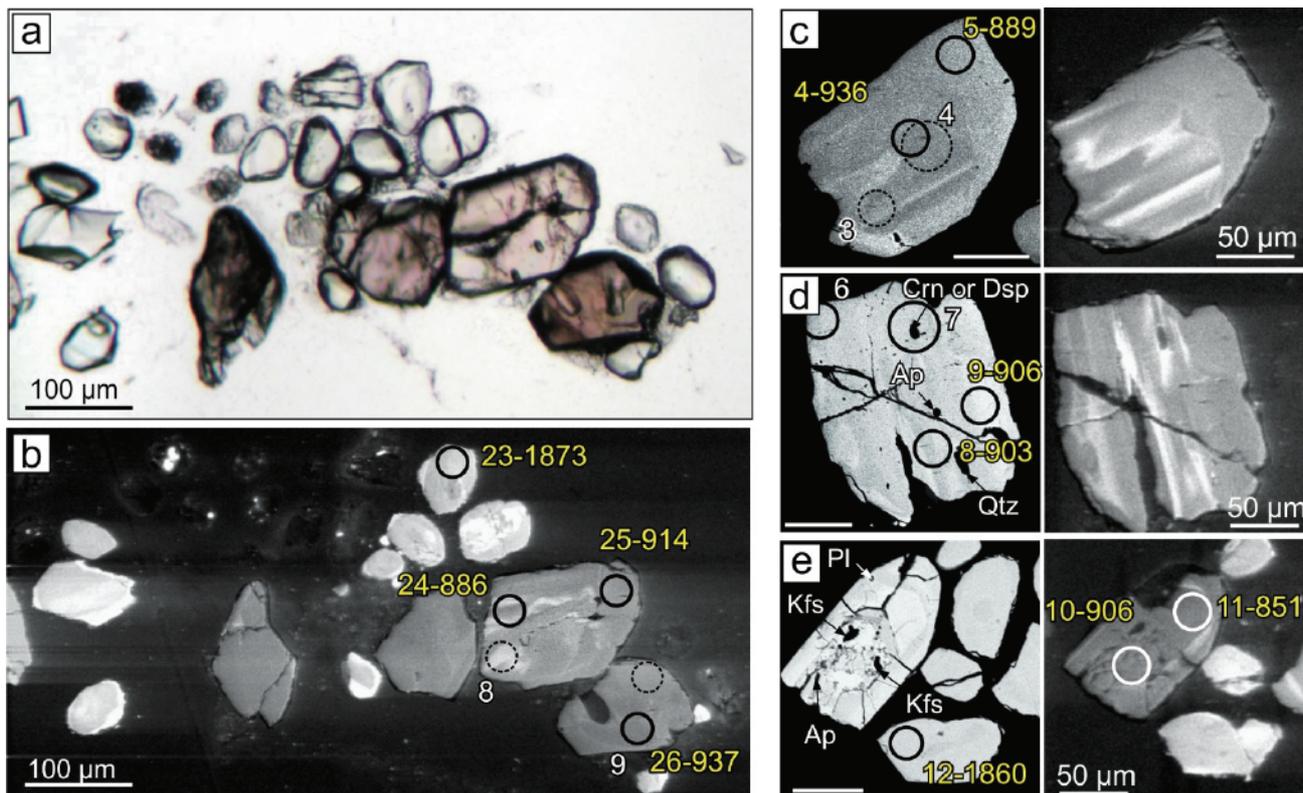


Рисунок 4. Микрофотография в проходящем свете (а), катодолюминесцентные (b-e) и BSE (b-e) изображения цирконов пробы s204y3-11, метагарцбургит. Сплошными черными кружками обозначены точки U-Pb изотопного анализа, прерывистыми кружками – точки элементного анализа. Желтые цифры: номер изотопного анализа, через тире $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст в млн лет. Белые цифры – номера элементного анализа.

Figure 4. PPL photomicrographs (a), (b) cathodoluminescence (b-e) and BSE (b-e) images of zircon from the metaharzburgite, sample s204s3/11. Black circles are points of U-Pb isotope dating; scatter circles are points of element analysis. Yellow numbers are numbers of isotope analysis and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age in Ma. White numbers are numbers of element analysis.

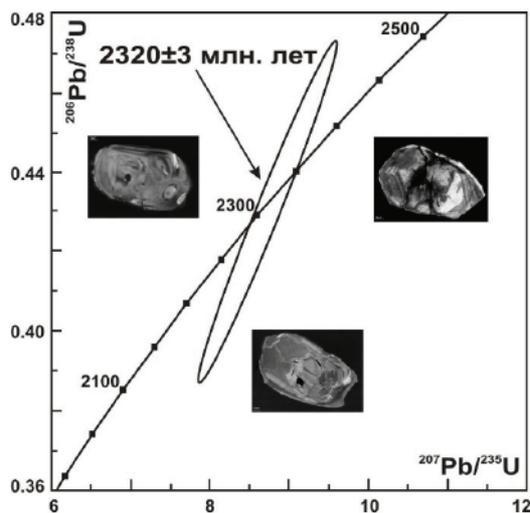


Рисунок 5. U-Pb диаграмма с конкордией для единичных зерен циркона из метагарцбургита, проба s204y2/21.

Figure 5. U-Pb zircon Concordia diagram for the single zircon grains from the metaharzburgite, sample s204s3/11.

(2) Коричневато-розовые угловатые обломки или зерна циркона второго типа, размером до 150-200 мкм в CL демонстрируют необычные структуры пламенивидного типа (рис. 5b-e) и содержит включения корунда (или диаспора), апатита, альбита, калиевого полевого шпата, биотита и кварца. Цирконы были датированы методом LA-ICPMS и дали субконкордантные значения неопротерозойского возраста ~900 млн лет (рис. 6). Циркон характеризуется широкими вариациями по содержанию Th (57-1000 ppm), U (179-727 ppm), величины Th/U отношения (0.16-1.45) с преобладанием высоких значений >1. Циркон содержит большое количество РЗЭ ($\text{Lu}_N/\text{La}_N = 19-1117$, $\text{Lu}_N/\text{Sm}_N = 5-52$),

редкоземельные спектры имеют отрицательную европиевую и слабовыраженную, вплоть до полного исчезновения цериевую аномалии ($Ce/Ce^* = 0.9-8.2$) (рис. 7а). В цирконе присутствуют заметные содержания несовместимых

элементов, петрогенных Fe, Ca и литофильных Ba, Rb, Sr (рис. 8). Точки составов циркона на дискриминационной диаграммах (Hoskin, 2005) тяготеют или лежат в поле цирконов гидротермального типа (рис. 7b).

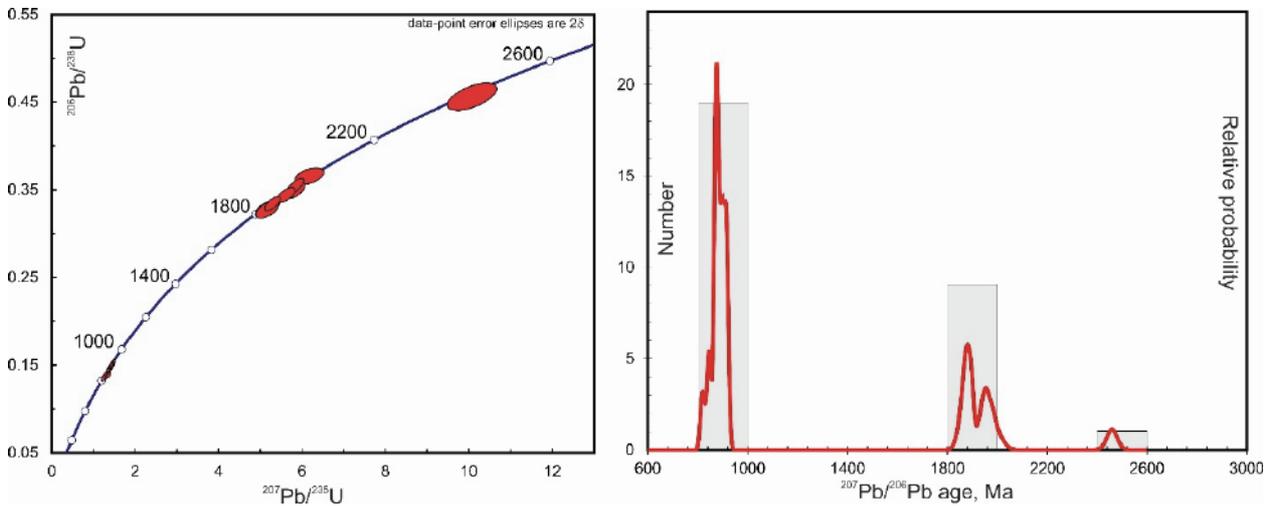


Рисунок 6. U-Pb диаграмма с конкордией (а) и гистограмма $^{207}Pb/^{206}Pb$ возрастов цирконов из метатарзбургитов, проба s204s3/11.

Figure 6. Concordia diagram of U-Pb zircon ages (a) and histogram of $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages (b) of zircon, obtained from the metaharzburgite, sample s204s3/11.

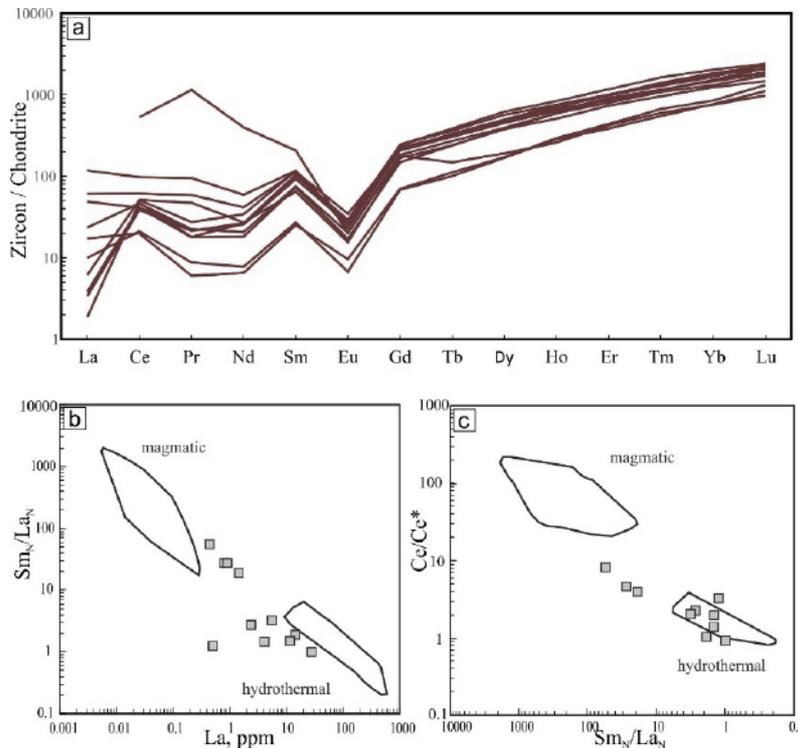


Рисунок 7. (а) Распределение РЗЭ в неопротерозойских цирконах из метатарзбургитов, проба s204y3/11. Хондрит по Sun & McDonough (1989); (b) Дискриминационные диаграммы La vs Sm_N/La_N и Ce/Ce^* vs Sm_N/La_N (Hoskin, 2005).

Figure 7. (a) REE chondrite normalized patterns for the Neoproterozoic zircon from the metaharzburgite, sample s204y3/11. Chondrite values are from Sun & McDonough (1989); (b) Discriminant diagrams of La vs Sm_N/La_N and Ce/Ce^* vs Sm_N/La_N (Hoskin, 2005).

В объеме каждого зерна содержание легких редкоземельных и несовместимых элементов заметно варьирует по количеству практически от нулевых значений до нескольких десятков, сотен или тысяч ppm в зависимости от конкретного элемента. Это хорошо видно при изучении изменения сигналов при углублении кратера в точке анализа (рис. 8). При нормальном распределении сигналов Zr, Y, Hf и HREE, сигналы LREE, а также некоторых петрогенных и литофильных элементов показывают контрастную интенсивность в разных частях спектра. При расчете таких анализов отдельными интервалами составы каждого интервала значительно отличаются. Это удобно продемонстрировать на

примерах распределения REE и других элементов в каждом интервале отдельного анализа (рис. 8).

Минимальные значения температуры, рассчитанные по содержанию Ti в цирконе по методу (Ferry, Watson, 2007) ~ 800°C и выше (в среднем 876 ± 56 °C, n=12) позволяют предполагать локальное высокотемпературное воздействие на породы горячих гидротермальных растворов в Неопротерозойское время ~900 млн лет назад.

Sm-Nd модельный возраст породы составил $T_{DM} = 1864$ при $\epsilon Nd = +5.5$. Изохроны, построенные по Sm-Nd составу породы, оливина и ортопироксена дали оценку возраста около 780 млн лет (рис. 9).

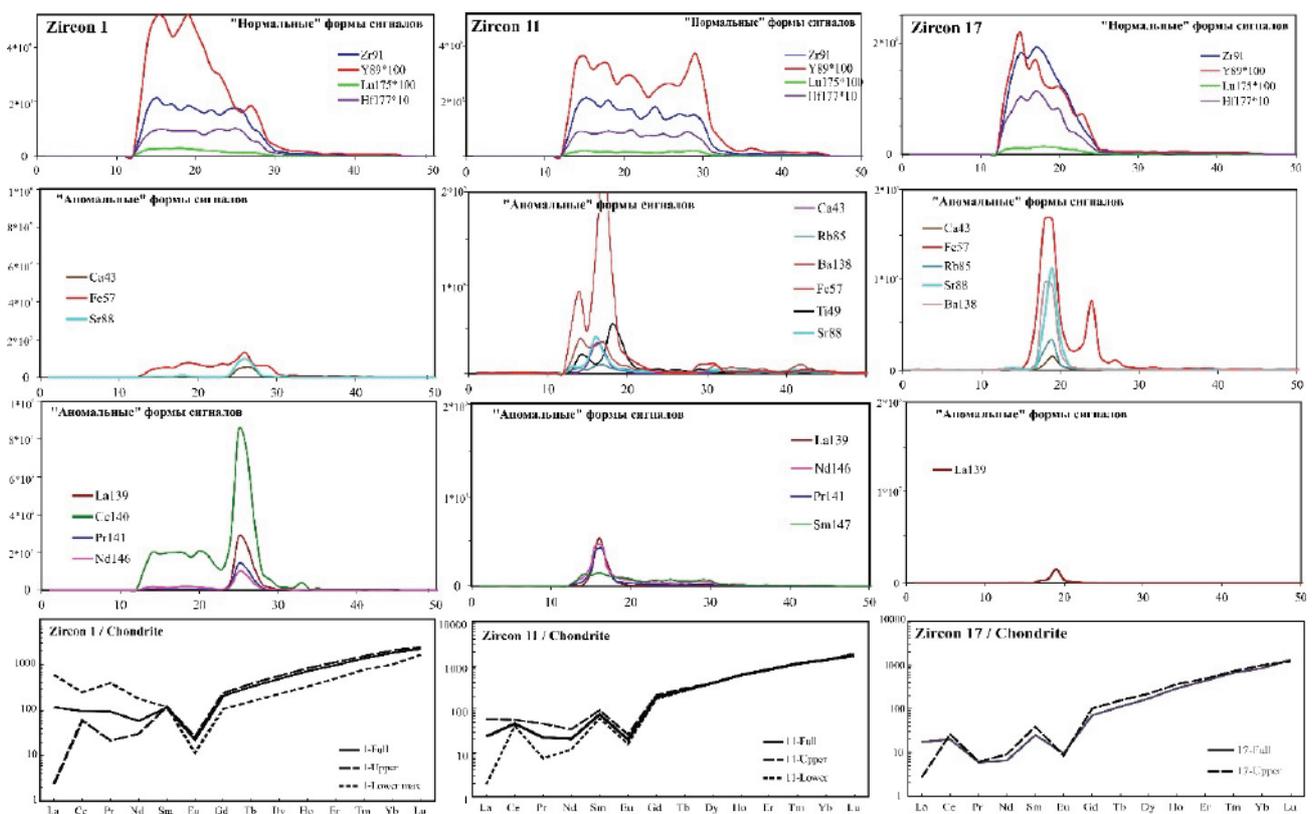


Рисунок 8. Характер сигналов, полученных при абляции зерен неопротерозойского циркона пробы s204y3/11.

Figure 8. Character of signals obtained during Neoproterozoic zircon ablation, sample s204y3/11

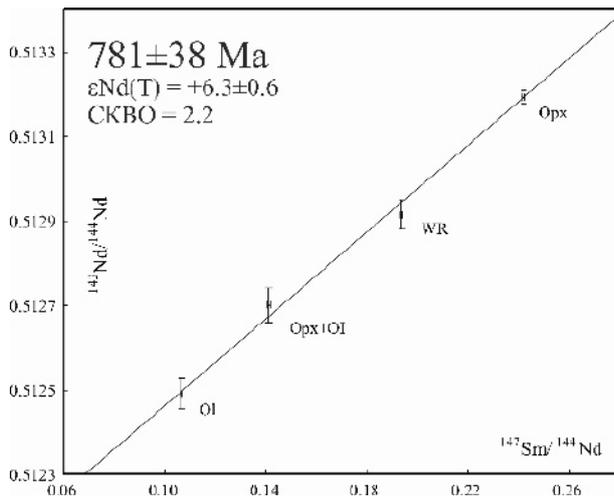


Рисунок 9. *Sm/Nd минеральная изохрона для метагартсбургитов, местонахождение Узкая Салма.*

Figure 9. *Sm-Nd mineral isochrons for the metagartzburgite, Uzkaia Salma locality.*

Обсуждение и выводы

Гипербазиты ассоциации Салма (по крайней мере часть гипербазитов – гидратированные и карбонатизированные гартсбургиты) (рис. 3) представляют собой породы метасоматизированной мантии, которые могли формироваться в надсубдукционных условиях, о чем свидетельствует их тесная пространственная связь с мезо-неоархейскими эклогитами (рис. 2), сформированными по коре океанического типа. На достаточно глубокий уровень формирования этих мантийных пород указывает распространенная в породе хромистая шпинель. С другой стороны, не исключено, что исследованные мантийные породы являются метаморфизованными ультраосновными членами нижних горизонтов офиолитового разреза мезоархейской океанической коры океана Салма.

Неопротерозойский циркон с возрастом ~900 млн лет – ранее не был известен в пределах ассоциации Салма Беломорской эклогитовой провинции. Неопротерозойский высокотемпературный гранулитовый метаморфизм с возрастом ~ 900 млн лет известен на Фенноскандинавском щите в пределах Sveконорвежского орогена (например, Hellström et al., 2004; Möller et al., 2003;

Möller et al., 2015; Söderlund et al., 2002; Andersson et al., 2002). Палеопротерозойский циркон в породах эклогитовой провинции проявлен очень широко и фиксирует этап метаморфизма, связанный с широким проявлением на территории щита сфекофенской орогении (Bibikova et al., 2004; Mints et al., 2010; Slabunov et al., 2006).

Состав неопротерозойского циркона, неоднородный, с обогащением в легких редкоземельных элементах и значительным колебанием по содержанию, меняющимся характеристиками цериевой и европиевой аномалий и величине Th/U отношения, значительной примесью несовместимых элементов (Fe, Ca, Ba, Rb, Sr и др.) (рис. 7а, 8), свидетельствует о росте такого циркона при участии флюида. Точки составов циркона на дискриминационной диаграммах (Hoskin, 2005) тяготеют или лежат в поле цирконов гидротермального типа (рис. 7b). К высоким оценкам температуры кристаллизации неопротерозойского циркона ~ 800°C и выше следует относиться с осторожностью, так как метасоматические процессы, обусловившие рост циркона, могли обеспечивать неравновесный привнос несовместимых элементов, в том числе и титана.

Полученные Sm-Nd данные об омоложенном возрасте гартсбургитов – около 780 млн лет – могут свидетельствовать о перестройке изотопной самарий-неодимовой системы на уровне минералов также под воздействием гидротермального процесса. Более молодой Sm-Nd возраст по сравнению с U-Pb возрастом по цирконам для этих пород, вероятно, связан с различными температурами закрытия изотопных систем в минералах. В целом, полученные данные свидетельствуют о преобразовании породы в условиях изотопно-открытой системы, при которой диффузия или привнос/вынос свинца, тория, урана, неодима, самария и других элементов контролировались гидротермальными

процессами, природа которых требует дальнейшего исследования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ГИН РАН, г. Москва (проект № 0120145918) и является вкладом в проект РФФИ № 20-05-00190.

Литература / Reference

- Anderson T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report 204Pb, 2002. *Chemical Geology* 192, 59–79.
- Andersson J., Möller C., Johansson L., 2002. Zircon geochronology of migmatite gneisses along the Mylonite Zone (S Sweden): a major Sveconorwegian terrane boundary in the Baltic Shield. *Precambrian Research* 114, 121–147.
- Bayanova, T.B., Corfu, F., Todt, W., Pohler, W., Apanasevich, E.A., Levkovich, N.V., Zhavkov, V.A., 2007. Heterogeneity of 91,500 and TEMORA-1 standards for U–Pb single zircon dating, in: Proc. XVIII Symp. on Isotope Geochemistry (Moscow, 14–16 November 2007). GEOKhI RAN, Moscow, pp. 42–43.
- Bibikova, E.V., Bogdanova, S.V., Glebovitsky, V.A., Claesson, S., Skiöld, T., 2004. Evolution of the Belomorian Belt: NORDSIM U–Pb zircon dating of the Chupa paragneisses, magmatism, and metamorphic stages. *Petrology* 12 (3), 195–210.
- Dokukina, K.A., Bayanova, T.B., Kaulina, T.V., Travin, A.V., Mints, M.V., Konilov, A.N., Serov, P.A., 2012a. Belomorian eclogite province: succession of events and age forming of igneous and metamorphic rocks of Gridino association. *Russian Geology and Geophysics* 53 (10), 1023–1054. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.006>.
- Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Van, K.V., Mints, M.V., Simakin, S.G., 2012b. Origin of Early Paleoproterozoic Zircons in Rocks of the Archean Eclogite Association of Gridino (Belomorian Eclogite Province). *Doklady Earth Sciences* 445 (1), 832–839. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X1207001X>.
- Dokukina K., Mints M., 2019. Subduction of the Mesoarchean spreading ridge and related metamorphism, magmatism and deformation by the example of the Gridino eclogitized mafic dyke swarm, the Belomorian Eclogite Province, eastern Fennoscandian Shield. *Journal of Geodynamics* 123, 1–37.
- Dokukina, K.A., Mints, M.V., Konilov, A.N., 2017. Melting of eclogite facies sedimentary rocks in the Belomorian Eclogite Province, Russia. *J. Metamorph. Geol.* 35, 435–451. <https://doi.org/10.1111/jmg.12239>.
- Dokukina K.A., Mints M.V., Konilov A.N., Sheshukov V.S., Khubanov V.B., Bayanova T.B., Van K.V., & Golovanova T.I., 2020. Palaeoproterozoic granulite-facies metamorphism at ~ 2.4 Ga in rocks of the Belomorian eclogite province, Fennoscandian Shield, Russia. *GeoScience*, 2, 4–23 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43851919>
- Dokukina, K.A., Kaulina, T.V., Konilov, A.N. et al., 2014. Archean to Palaeoproterozoic high-grade evolution of the Belomorian Eclogite Province in Fennoscandian Shield (Gridino area): geochronological evidences. *Gondwana Research*, 25, 585–613.
- Dokukina, K.A. & Konilov, A.N., 2011. Metamorphic evolution of the Gridino mafic dyke swarm (Belomorian Eclogite Province, Russia). In: *Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 5 Years after the Discovery of Coesite and Diamond* (eds Dobrzhinetskaya, L.F., Faryad, S.W. & Wallis, S.), pp. 579–621. Elsevier, Amsterdam.
- Ferry, J.M., & Watson, E.B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154, 429–437.
- Hellström F.A., Johansson Å., Larson S.Å., 2004. Age and emplacement of late Sveconorwegian monzogabbroic dykes, SW Sweden. *Precambrian Research* 128, 39–55.
- Hoskin, P.W.O., 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 637–648.
- Imayama T., Oh C.-W., Baltybaev S.K., Park C.-S., Yi K., & Jung H., 2017. Paleoproterozoic high-pressure metamorphic history of the Salma eclogite on the Kola Peninsula, Russia. *Lithosphere*, 9 (6), 855–873. <https://doi.org/10.1130/L657.1>.
- Konilov A.N., Shchipansky A.A., Mints M.V., Kaulina T.V., Dokukina K.A., Bayanova T.B., Natapov L.M., Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. The Salma eclogites from the Belomorian Province, Russia: evidence for HP/UHP metamorphism through the subduction of the Mesoarchean oceanic crust. In: (Dobrzhinetskaya, L., Cuthbert, S., Faryad, W., Wallis, S., Eds.) *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 Years After the Discovery of Coesite and Diamond*. Elsevier. 2011. 19. P. 623–670.
- Ludwig K.R. Isoplot V. 4.15: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Special Publication No. 4. Berkeley Geochronology Center. 2008. 76 p.
- Li, X.L., Zhang, L.F., Wei, C.J., Slabunov, A.I., Bader, T., 2017. Neoproterozoic granulite-facies metamorphism in Uzkaya Salma eclogite-bearing mélange, Belomorian Province (Russia). *Precambrian Res.* 294, 257–283.
- Mel'nik, A.E., Skublov, S.G., Marin, Yu.B., Berezin, A.V., Bogomolov, E.S., 2013. New data on the age (U–Pb, Sm–Nd) of garnetites from Salma eclogites of the Belomorian Mobile Belt. *Dokl. Earth Sci.* 448 (Part 1), 78–85.
- Mints, M.V., Dokukina, K.A., 2020. Age of eclogites formed by the subduction of the Mesoarchean oceanic crust (Salma, Belomorian Eclogite Province, Kola peninsula, Russia): A synthesis // *Precambrian Research* 350 (2020) 105879, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105879>
- Mints, M.V., Belousova, E.A., Konilov, A.N. et al., 2010a. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula Russia. *Geology*, 38, 739–742.
- Mints, M.V., Dokukina, K.A. & Konilov, A.N., 2014. The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: tectonic position and geodynamic evolution. *Gondwana Research*, 25, 561–584.
- Mints, M.V., Dokukina, K.A. & Konilov, A.N. et al., 2015. Mesoarchean Kola-Karelia continent. In: *East European Craton: Early Precambrian History and 3D models of deep crustal structure* (eds Condie, K. &

- Harvey, F. E.), Geological Society of America, Special Paper, 510, 15–88, Boulder, CO.
24. Möller, A., O'Brien, P. J., Kennedy, A., Kroner, A. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: an example from the ultra-high-temperature granulites of Rogaland (SW Norway). From: Vance, D., Möller, W., & Villa, I. M. (eds) 2003. Geochronology: Linking the Isotopic Record with Petrology and Textures. Geological Society, London, Special Publications, 220, 65–81.
 25. Möller C., Andersson J., Dyck B., Lundin I.A., 2015. Exhumation of an eclogite terrane as a hot migmatitic nappe, Sveconorwegian orogen. Lithos 226, 147–168
 26. Pozhilenko, V.I., Gavrilenko, B.V., Zhirov, D.V., and Zhabin, S.V., 2002, Geology of Ore Districts in Murmansk Region: Apatity, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, 359 p. [in Russian].
 27. Skublov, S.G., Astaf'ev, B.Yu., Marin, Yu.B., Berezin, A.V., Mel'nik, A.E., Presnyakov, S.L., 2011a. New data on the age of eclogites from the Belomorian mobile belt at Gridino settlement area. Dokl. Earth Sci. 439 (2), 1163–1170. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11080290>.
 28. Skublov, S.G., Berezin, A.V., Mel'nik, A.E., 2011b. Paleoproterozoic eclogites in the Salma area, Northwestern Belomorian mobile belt: composition and isotopic geochronologic characteristics of minerals and metamorphic age. Petrology 19 (5), 470–495. <https://doi.org/10.1134/S0869591111050055>.
 29. Slabunov, A.I., Bibikova, E.V., Stepanov, V.S., Volodichev, O.I., Balaganskii, V.V., Stepanova, A.V., Sibelev, O.S., 2006a. Neoproterozoic Belomorian mobile belt, in: Morozov, A.F., Mezhelovskii, N.V., Pavlenkova, N.I. (Eds.), Structure and Dynamics of the Lithosphere beneath Eastern Europe, as Inferred from EUROPROBE Studies [in Russian]. GEOKART, GEOS, Moscow, pp. 143–151.
 30. Söderlund U., Möller C., Andersson J., Johansson L., Whitehouse M., 2002. Zircon geochronology in polymetamorphic gneisses in the Sveconorwegian orogen, SW Sweden: ion microprobe evidence for 1.46–1.42 and 0.98–0.96 Ga reworking Precambrian Research 113, 193–225.
 31. Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Publ. 42, pp. 313–345.
 32. Van Achterbergh E., Ryan C.G., Jackson S.E., Griffin W.L. Data reduction software for LA-ICP-MS: appendix // LA-ICP-MS in the Earth Sciences: Principles and Applications / Ed. P.J. Sylvester. Mineralogical Association of Canada Short Course Series. 2001. V. 29. P. 239–243.
 33. Whitney, D.L. & Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95, 185–187.
 34. Yu, H.L., Zhang, L.F., Wei, C.J., Li, X.L., Guo, J.H., 2017. Age and P–T Conditions of the Gridino-type eclogite in the Belomorian Province, Russia. J. Metamorph. Geol. 35, 855–869.



NEOPROTEROZOIC HYDROTHERMAL ZIRCON IN METASOMATIZED HARZBURGITES OF THE SALMA ECLOGITE ASSOCIATION, BELOMORIAN ECLOGITE PROVINCE

*Dokukina K.A.*¹ *Okina O.I.*¹ *Sheshukov V.S.*¹ *Bayanova T.B.*² *Serov P.A.*² *Pozhilenko V.I.*²

¹ Geological institute GIN RAS, Moscow, Russia

² Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: dokukina@mail.ru

Аннотация: Paleoproterozoic and Neoproterozoic zircons were obtained from metaharzburgites of the Salma association of the Belomorian eclogite province of the Fennoscandian Shield. Paleoproterozoic zircon is represented by small (20–150 μm) rounded colorless grains, zonal in cathodoluminescence: grey zonal cores are surrounded by light grey rims. The one dated core gave the Early Paleoproterozoic U–Pb age of ~2.46 Ga. Light zircon rims have the Late Paleoproterozoic U–Pb age of ~1.8–1.9 Ga. Brownish-pink angular clasts or zircon grains, up to 150–200 μm in size, in cathodoluminescence demonstrates unusual structures of a flame-like type and gave subconcordant values of the Neoproterozoic age of ~900 Ma. Neoproterozoic zircon is characterized by wide variations in the content of Th (57–1000 ppm), U (179–727 ppm), the value of Th/U ratio (0.16–1.45) with a predominance of high values more than one. Zircon contains a large amount of light rare-earth elements (340–995 ppm) with a high content of light ($L_{UN}/L_{AN} = 19–1117$, $L_{UN}/Sm_N = 5–52$), has a negative europium and weakly expressed, up to the complete disappearance of the cerium anomaly ($Ce/Ce^* = 0.9–8.2$). Zircon contains significant values of incompatible elements, petrogenic Fe, Ca, Sr and lithophilic Ba, Rb, Sr. The composition points of zircons on the La vs SmN/LaN and Ce/Ce* discrimination diagrams gravitate or lie in the field of hydrothermal-type zircons. The Sm–Nd mineral isochrone also indicates the rejuvenated Neoproterozoic age of metaharzburgite, about 780 Ma, and a rearrangement of the samarium-neodymium isotope system at the mineral level under the influence of a hydrothermal process.

Ключевые слова: eclogite, harzburgite, metasomatism, hydrothermal zircon.

© Коллектив авторов, 2022

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ: АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ

Кафтан В.И.¹Побединский Г.Г.²Савиных В.П.³Столяров И.А.⁴¹ Геофизический центр РАН² Российское общество геодезии, картографии и землеустройства³ Московский государственный университет геодезии и картографии⁴ ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных»E-mail: kaftan@geod.ru

Аннотация: В работе рассмотрены три реализации глобальных (общеземных) систем координат (отсчета) ITRF, WGS-84 и ПЗ-90. Показано, что высокоразвитые страны с большой территорией создают национальные спутниковые геодезические сети, реализующие национальные системы координат. Приведено обоснование необходимости поддержания и развития национальной государственной геодезической системы координат ГСК-2011 для геодезических и картографических работ на территории страны, при одновременном участии Российской Федерации в создании по инициативе ООН общеземной геодезической системы координат (отсчета).

Ключевые слова: геодезические системы координат, системы отсчета, международное сотрудничество, государственное геодезическое обеспечение.

Введение

В 2021 году РИА Новости опубликовали утверждение: «в стране действует две актуальные системы – та, которая используется для космических полетов и различных задач в глобальном масштабе – параметры Земли ПЗ– 90.11 (2011 года) и государственная геоцентрическая система координат ГГСК-2011, которая используется для социально-экономических задач. Методы построения их одинаковы, поэтому одной из задач на ближайшие годы согласно консолидированной позиции Минобороны и Росреестра станет переход на единую систему координат на основе системы ПЗ–90 в версии соответствующего года»¹. Конечно, в средствах массовой информации, могут быть некоторые неточности, но утверждение «Минобороны и Росреестр согласовали необходимость перехода России на единую систему координат на основе системы параметров Земли ПЗ-90» со ссылкой на

РИА Новости было опубликовано на значительном количестве как массовых^{2, 3}, так и специализированных^{4, 5, 6} информационных ресурсов.

С одной стороны, это утверждение соответствует современным тенденциям глобализации. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» [10] отметила «экономическое и научное значение и растущую необходимость наличия четкой и устойчивой глобальной геодезической системы координат (ГГСК) для всей планеты, которая позволила бы обеспечивать взаимную увязку геодезических измерений, производимых в любом районе Земли и в космосе, включая определения пространственного положения и гравиметрические измерения, в качестве основы и отправной точки при установлении местоположения и высоты для геопространственной информации, используемой во многих науках о Земле и в самых разных сферах жизни

¹ <https://ria.ru/20210316/karutin-1601341081.html>² https://www.gazeta.ru/science/news/2021/03/16/n_15744386.shtml³ <https://www.vesti.ru/article/2537202>⁴ <http://www.gisa.ru/130625.html>⁵ <https://nedgeo.ru/rossiya-perejdet-na-edinuyu-sistemu-koordinat/>⁶ <http://www.miigaik.ru/about/news/3595/>

общества, в том числе в целях мониторинга уровня моря и изменения климата, борьбы с опасными природными явлениями и бедствиями, а также в целом ряде отраслей (включая горнодобывающую промышленность, сельское хозяйство, транспорт, судоходство и строительство), в которых точное определение координат обеспечивает повышение эффективности» [10]. Резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН [10] и программным документом рабочей группы подкомитета по геодезии Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией [9] была отмечена важность международного сотрудничества, без которого ни одна страна не может в одиночку справиться с задачей создания глобальной геодезической системы координат.

Это утверждение не совсем справедливо, так как по крайней мере две страны в мире сумели создать и длительное время поддерживать глобальные (общеземные) системы координат [5, 6, 7]:

- WGS-84 (США) [18];
- ПЗ-90 (Российская Федерация) [4].

Развитие научно-технического прогресса требует непрерывного совершенствования системы государственного геодезического обеспечения, включающего координатные, высотные и гравиметрические определения. В международном научном сообществе в сфере астрономии, геодезии и геофизики сформировались следующие понятия и термины координатного обеспечения, представляющие наиболее универсальное, широкое и конкретизированное понимание вклада математики и физики в решение пространственно-временных задач:

- координатная система отсчета;
- координатная (геодезическая) основа государства [15].

Согласно международным определениям, система отсчета объединяет в себе

систему координат, правила ее фиксации и ориентирования по отношению к изучаемому объекту, фундаментальные геодезические и физические константы, модели, обеспечивающие ее применение на практике. Геодезическая основа воспроизводит (реализует) идеальную координатную систему отсчета в реальном мире, и представляет собой геодезическую сеть с каталогом координат ее пунктов.

В отечественной терминологии все эти понятия, объединены одним общим термином «геодезическая система координат» или «система координат», представляющая собой геодезическую категорию, определяемую совокупностью трех компонент:

- математические правила, декларативно описывающие характеристики системы;
- принципы ориентирования координатных осей, фиксации начала координат, параметры эллипсоида и другие исходные геодезические даты;
- практическая реализация системы координат в виде опорных геодезических сетей, представляющих собой совокупность геодезических пунктов, закрепленных на поверхности Земли, каталогов их координат и скоростей перемещений на заданную эпоху.

Дальнейшее изложение мы будем продолжать, используя этот отечественный термин, иногда конкретизируя, что именно имеется в виду.

Варианты современных систем координат (отсчёта) и их реализаций

Наибольшее распространение в настоящее время получили пространственные геоцентрические прямоугольные (декартовы) системы координат, начало координат которых близко к центру масс Земли, одна из осей направлена на земной полюс (близка к оси вращения Земли), другая расположена на экваторе и направлена на начальный (Гринвичский) меридиан, третья дополняет

систему до трехмерной декартовой. В этой системе участвует отсчетный эллипсоид вращения, позволяющий осуществлять переход к эллипсоидальной системе координат и системам координат картографических проекций. Важнейшим элементом является модель гравитационного поля Земли.

Реализации рассмотренных систем представлены в нескольких вариантах [7, 13]. В зависимости от метода определения координат пунктов реализации системы отсчета, они подразделяются на динамические и кинематические. Динамические орбитальные реализации представляются эфемеридами искусственных спутников современных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). К таким относятся широкоэмиттерные эфемериды, передаваемые в навигационном сообщении космических аппаратов навигационных систем (в данном исследовании рассматриваются GPS и ГЛОНАСС), а также их наиболее точные значения, вырабатываемые аналитическими центрами обработки спутниковых геодезических данных. Это спутниковые эфемериды, представленные в земной геоцентрической системе, в отличие от эфемерид, определяемых в квази-инерциальной системе отсчета. Такие реализации чувствительны к параметрам вращения Земли (ПВЗ), принятым в вычислениях спутниковых эфемерид [13].

В то же время кинематические реализации в большей степени ориентированы на пользователя. Среди них также различают два типа.

1. Реализации станций слежения («T-frames»), представленные набором координат (и иногда скоростей) сети станций слежения, используемой при получении эфемерид динамическим методом.

2. Сетевые реализации («N-frames»), представленные сетью пассивных пунктов с координатами (и иногда скоростями), определенными путем

обработки данных наблюдений спутниковых систем GPS или/и ГЛОНАСС.

Таким образом координатные системы реализуются тремя основными наборами координат. Это эфемериды искусственных спутников, координаты станций слежения, обслуживающих навигационные системы, и координаты пассивных наблюдательных станций.

Важнейшие глобальные и государственные геодезические системы координат

Точность реализации любой геодезической системы координат определяется точностью координат пунктов геодезической сети, использованных при выводе параметров этой системы. Наиболее точной и эффективной глобальной спутниковой геодезической сетью является практическая реализация международной земной опорной системы (International Terrestrial Reference System - ITRS), именуемая International Terrestrial Reference Frame (ITRF) [5, 6, 7, 11]. Принципы ориентации такой системы координат в теле Земли определены Международной службой вращения Земли - МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS) и Международной ассоциацией геодезии - МАГ (International Association of Geodesy - IAG), являющейся одной из восьми ассоциаций Международного геодезического и геофизического союза - МГГС (International Union of Geodesy and Geophysics - IUGG). Она реализована на системе параметров Земли 1980 года (GRS80) официально принятыми XVII генеральной ассамблеей Международного геодезического и геофизического союза (МГГС) - International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) в Канберре в декабре 1979 г. [2, 7, 17]. Реализация получена путем объединенной обработки четырех наземных глобальных наблюдательных сетей, образованных различными методами космической геодезии: радиоинтерферометрии со

сверхдлинной базой – РСДБ (Very Long Baseline Interferometry - VLBI), лазерной локации спутников – ЛЛС (Satellite Laser Ranging - SLR), доплеровской спутниковой системой DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), глобальными навигационными спутниковыми системами - ГНСС (Global Navigation Satellite System - GNSS), такими как GPS (США), ГЛОНАСС (Россия). Полная сеть ITRF2014 состоит из 1499 наблюдательных комплексов, расположенных на 975 станциях, примерно на 10% из которых размещены два, три или четыре различных инструмента космической геодезии. Основными новациями, реализованными в ITRF14, являются точные оценки сезонных сигналов, присутствующих во временных рядах положения станций, и моделирование постсейсмической деформации для мест, подверженных сильным землетрясениям [11]. Готовится к выпуску очередная реализация ITRF2020⁷. ITRF доступна всем пользователям, как военным, так и гражданским и используется как опорная для всех остальных глобальных реализаций координатных систем отсчета. Реализация является кинематической, так как представляет пользователю каталог координат на заданную эпоху и скорости их изменения. Представляет точную количественную информацию для геофизических исследований [16]. Заметим, что эта система осуществляет важнейшую научную функцию глобальных наблюдений главных переменных Земли и на ее основе создается глобальная система координат под эгидой ООН.

Так как Международная служба ГНСС (International GNSS Service - IGS) является основополагающим сегментом ITRF по количеству и густоте распределения наблюдательных станций, то можно говорить об орбитальной реализации ITRF посредством точных эфемерид спутников ГНСС, вырабатываемых службой IGS и доступной широкому

пользователю. Следует отметить, что на территории России расположено только 22 пункта IGS, данные наблюдений и координаты которых включены в каталоги ITRF [5, 6, 7].

Мировая геодезическая система WGS 84 основана на согласованном наборе постоянных и параметров модели, описывающей размеры, форму Земли, а также гравитационные и геомагнитные поля. WGS 84 установлена Министерством обороны США в качестве глобальной для обеспечения функционирования и использования ГНСС GPS. В настоящее время она строго и точно согласована с системой ITRS. Первым вариантом этой системы была WGS60, построенная с использованием наземных астрономо-геодезических и гравиметрических измерений, а также первых навигационных систем США и Канады. Сама система земных параметров и ее реализация регулярно уточнялись и обновлялись. Последняя реализация системы G1762 строго согласуется с ITRF14 на сантиметровом уровне, имея нулевые параметры взаимного трансформирования. Система реализуется в трех вариантах: сети следящих станций (несколько десятков обсерваторий глобального распределения), широковещательные эфемериды спутников GPS (с точностью порядка метров), точные эфемериды спутников GPS вырабатываемые Национальным агентством геопространственной разведки (National Geospatial-Intelligence Agency) для решения оборонных задач. Следует отметить, что точность определения местоположения и навигации в системе WGS84 может быть избирательно закруглена, так как система имеет, как гражданское, так и военное применение [18].

Параметры Земли 1990 года – глобальная система отсчета, включающая в себя фундаментальные геодезические постоянные, параметры общеземного эллипсоида, гравитационного поля Земли, геоцентрическую систему

⁷ <http://itrf.ign.fr/doc ITRF/CFP-ITRF2020.pdf>

координат и параметры ее связи с другими системами координат [4]. Система разработана и поддерживается Министерством обороны Российской Федерации и предназначена для обеспечения функционирования глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, тем самым являясь аналогом системы WGS84. Первые параметры Земли ПЗ-62 были разработаны профессором Л. П. Пеллиным [2] и, аналогично WGS84, регулярно уточнялись и пересматривались в связи с совершенствованием наблюдательных средств. Система координат ПЗ-90.11 реализована 1) несколькими десятками следящих станций – пунктов космической геодезической сети (субконтинентального распределения), 2) ширококвещательными эфемеридами спутников ГЛОНАСС. Земная реализация ПЗ-90.11 согласована с ITRF14 с субсантиметровой точностью. Ширококвещательные эфемериды доступны пользователю с точностью порядка первых метров. Система имеет двойное применение, по аналогии с WGS84. В 2002 году система координат получила статус государственной в части ее применения в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач, а с 2016 года также в целях выполнения геодезических и картографических работ в интересах обороны страны.

Помимо участия в создании и поддержании глобальных (общеземных) систем координат, высокоразвитые страны с большой территорией одновременно создают национальные спутниковые геодезические сети, реализующие национальные системы координат. Современные национальные системы координат, с одной стороны, являются геоцентрическими, максимально приближенными к международной системе ITRS и ее практической реализации ITRF. С другой стороны, национальные системы координат оптимальным образом ориентированы на реализацию государственного геодезического и картографического потенциала, уже созданного к

этому времени. Характерными примерами национальных систем координат являются системы координат США (National Spatial Reference System - NSRS), Канады (Canadian Spatial Reference System - CSRS), Австралии (Geocentric Datum of Australia - GDA), Европейского союза (European Terrestrial Reference System - ETRS89, Китая (China Geodetic Coordinate System 2000 - CGCS 2000) и России (Геодезическая система координат 2011 года – ГСК-2011). Учитывая значительный территориальный охват таких систем координат, их практические реализации достаточно близки к глобальным (общеземным) системам. На рис. 4 показаны зоны действия таких систем координат [7].

Разработка и создание геодезической системы координат 2011 года (ГСК-2011) является логическим шагом в развитии геодезического обеспечения в России. История создания государственной геодезической спутниковой сети и государственной геодезической системы координат ГСК-2011 опубликована в журнале «Геодезия и картография», докладывалась на международных и национальных научных форумах [7], а также подробно раскрыта в одной из последних публикаций выдающегося советского и российского ученого-геодезиста, ведущего идеолога этой работы Г. В. Демьянова - монографии «ГЛОНАСС и геодезия», в которой он является научным редактором, соавтором большинства разделов, и которую он непосредственно редактировал в последние годы жизни [1].

ГСК-2011 представляет собой геоцентрическую систему координат. По принципам ориентировки в теле Земли ГСК-2011 идентична Международной земной опорной системе координат ITRS. Основу системы координат ГСК-2011 составили пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), использованные при выводе параметров этой системы. Общее число пунктов, включенных в уравнивание 46,

в том числе российских 38, зарубежных 8. Механизм привязки ФАГС к «каркасной» сети опорных пунктов IGS основан на широко используемом IERS методе «мягкого согласования». Согласно этому методу, при уравнивании суточных сеансов измерений на первом этапе сеть рассматривается как «свободная», т.е. координаты опорных пунктов не фиксируются жестко, а вычисляются вместе с

координатами других пунктов. На втором этапе осуществляется трансформирование (по Гельмерту) вычисленной «свободной» сети под условием минимума суммы квадратов отклонений полученных координат опорных пунктов от их принятых значений. Процедуры установления системы координат и технические характеристики системы ГСК-2011 описаны в работах [1, 7, 8, 19].



Рис. 1. Национальные геодезические системы координат [7].
 Fig. 1. National geodetic coordinate systems [7].

Пункты ФАГС являются стационарными астрономо-геодезическими обсерваториями, оборудованными комплексом прецизионной аппаратуры: стандартами частоты, метеорологическими датчиками, аппаратурой слежения за локальными деформациями земной поверхности в районе расположения обсерватории и стабильностью положения сооружения, на котором размещаются антенны, и т.д. Все пункты фундаментально закреплены с обеспечением долговременной стабильности их положения как в плане, так и по высоте. Технические требования к пунктам ФАГС

определены национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 53374-2016. По состоянию на 1.01.2019 государственная геодезическая спутниковая сеть Российской Федерации включает 67 пунктов ФАГС, 363 пункта ВГС и более 5 000 пунктов СГС-1. В 2018 г. введено 4 новых пункта ФАГС, в том числе самый северный пункт ФАГС «Баренцбург» на острове Шпицберген [7, 19].

ГСК-2011 была официально установлена в 2012 году постановлением

Правительства Российской Федерации⁸. После принятия нового Федерального закона, регулирующего геодезическую деятельность⁹ эта система координат была в 2016 г. без изменений вновь установлена Постановлением Правительства Российской Федерации¹⁰.

Система является кинематической, так как представляет каталог координат пунктов ФАГС и скоростей их перемещений¹¹. Система заменила прежнюю государственную квазигеоцентрическую систему координат 1995 года, реализованную с помощью пунктов Государственной геодезической сети, Доплеровской геодезической сети и Космической

геодезической сети. В системе ГСК-2011 вычисляются точные эфемериды спутников ГЛОНАСС¹². Наблюдательная сеть, используемая при расчете орбит, состоит из 32 Российских и 58 зарубежных постояннодействующих ГНСС станций. Средняя квадратическая ошибка координат спутников оценивается значениями 2-3 см. Результаты определения орбит, так же, как и измерительные данные, хранятся в открытом доступе. Этот общедоступный сервис обеспечивает высокоточные определения местоположения при разреженной сети опорных пунктов (метод PPP - Point Precise Positioning).

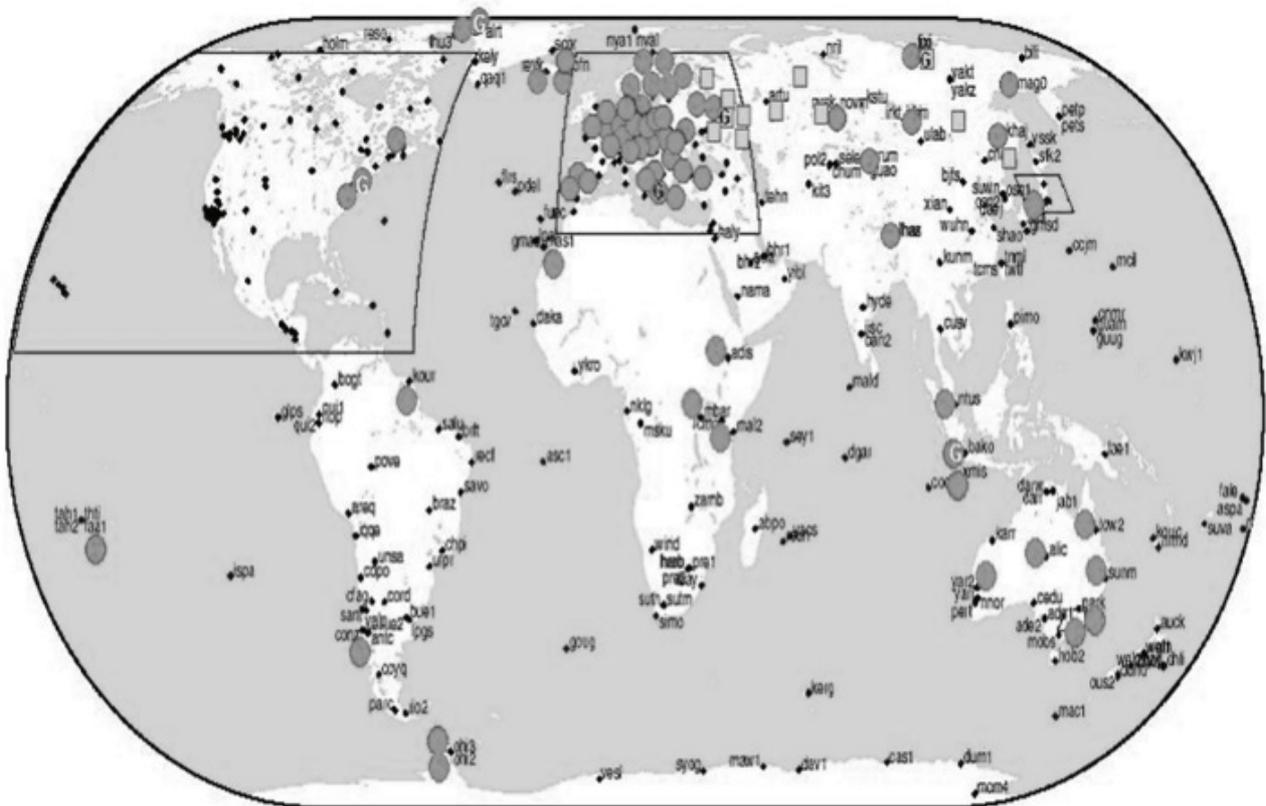


Рис. 2. Схема сети, используемая для вычисления точных эфемерид ЦНИИГАиК
 Fig. 2. The network diagram used to calculate the exact ephemerides of TsNIIGAiK

⁸ Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат»
⁹ Федеральный закон от 30 декабря 2015 г. № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

¹⁰ Постановление Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. № 1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы»
¹¹ <https://cgkipd.ru/opendata/fags/>
¹² <https://rgs-centre.ru/>

ГСК-2011 предназначена для оптимизации перехода государственного картографо-геодезического производства и научных исследований на современные космические технологии. Создание и развитие ГСК-2011 входит в круг государственных задач Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестра).

Взаимная согласованность геоцентрических систем координат

Около полувека общедоступная и точная реализация общеземной геоцентрической системы координат ITRF используется в качестве эталонной, контрольной и опорной для глобальных и национальных систем координат.

Для этой цели используются следующие формулы преобразования подобия Декартовых пространственных координат X , Y и Z , из системы 1 в систему 2, принятые в ITRF конвенциях [14]:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R3 & R2 \\ R3 & D & -R1 \\ -R2 & R1 & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$

где $T1$, $T2$ и $T3$ – параметры параллельного переноса начала координат для каждой из осей; $R1$, $R2$ и $R3$ – параметры поворота системы вокруг соответствующих координатных осей; D – масштабный параметр.

Для орбитальных реализаций системы WGS84¹³ начиная с 1991 года все параметры трансформирования принимаются нулевыми с погрешностью 0.1 м.

В 1998 г. был организован Международный ГЛОНАСС эксперимент (IGEX98), в процессе которого оценивалось взаимное согласование систем координат WGS84 и ПЗ-90 [13]. По широко-вещательным эфемеридам спутников ГЛОНАСС, определяемым в других системах координат, было установлено взаимное согласование систем на метровом

уровне. При этом так называемый «долготный разворот» (взаимный поворот системы вокруг полярной оси Z) был получен в среднем равным 0,35", что составляло примерно 11 м на земной поверхности и в несколько раз больше на высоте орбит искусственных спутников. В то же время для взаимного преобразования координат сети станций ГЛОНАСС аналогичный разворот был примерно вдвое меньшим [12].

В современной реализации ПЗ-90.11 эти рассогласования устранены и все элементы взаимного трансформирования получены нулевыми со средней квадратической разностью 1 см [4].

Формулы и параметры преобразования для динамических систем координат WGS84 (G1762) и ПЗ-90.11 приведены в [4, 18].

Государственная геоцентрическая система координат ГСК-2011 гражданского назначения согласована с ITRF2008. Обе системы имеют нулевые параметры взаимного преобразования со средней квадратической разностью 1 см. Формулы и параметры преобразования для кинематической системы ГСК-2011 приведены в работе «Геодезическая система координат 2011 года», опубликованной в сборнике «Астрономия, геодезия и геофизика» [8], в связи с задержкой выхода Руководства по работе с ГСК-2011. На сегодняшний день координаты всех пунктов Государственной геодезической сети (ГГС), включающей ФАГС, ВГС, СГС-1 и астрономо-геодезическую сеть 1-4 классов преобразованы в ГСК-2011 [3].

Сравнительная оценка характеристик государственных систем координат Российской Федерации по отношению к международной ITRF2014 представлена в таблице.

¹³ <https://confluence.qps.nl/qinsy/latest/en/world-geodetic-system-1984-wgs84-182618391.html>

Сравнительная оценка характеристик государственных систем координат Российской Федерации по отношению к международной ITRF2014

Характеристики	ITRS/ITRF2014			ГСК-2011			ПЗ-90.11		
	Наземная сеть	Эфемериды		Наземная сеть	Эфемериды		Наземная сеть	Эфемериды	
		Точные	Бортовые		Точные	Бортовые		Точные	Бортовые
Доступ	Открытый		-	Открытый		-	Ограничен	-	Открыт
Пространственное распределение	Глобальное		-	Глобальное		-	Региональное	-	Глобальное
Число пунктов	1499	507	-	90	90	-	23	-	
Эллипсоида 1/α	6378137.0 м 1/298.257222101			6378 136,5 м 1/298,256 4151			6 378 136 м 298,25784		
Каталог	Кинематический		-	Кинематический		-	Переопределяемый	-	-

Сопоставление характеристик государственных систем координат Российской Федерации с мировой WGS84 в таблице не отражено ввиду того, что последняя строго взаимно согласована с ITRF2014 на сантиметровом уровне точности.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ государственных систем координат Российской Федерации в сравнении с международными позволил сформулировать следующие общие заключения.

Система координат ПЗ-90.11 является полным аналогом мировой системы WGS84, как по ее назначению, так и по техническим характеристикам. Она предназначена и эффективно применяется для решения навигационных и

оборонных задач. Не обеспечивает решение задач государственного картографо-геодезического обеспечения и кадастра, а также глобальных научных задач сферы наук о Земле.

Система координат ГСК-2011, являясь преемницей государственных систем координат 1942 и 1995 гг., позволяет решать широкий круг задач государственного координатного обеспечения на высоком уровне точности, в соответствии с принятыми международными стандартами. Система представляет собой основу создания и регулярного обновления государственных топографических карт и планов, как в бумажном, так и цифровом виде. Она, являясь кинематической системой, используемой в непрерывном режиме, обеспечивает актуальность координат пунктов государственной геодезической сети и

учет динамики земной поверхности, как для решения геофизических задач от глобального до локального масштабов, так и мониторинга инженерных сооружений, изменения границ землепользования и объектов недвижимости. Система ГСК-2011 является важнейшим элементом технологии государственного картографо-геодезического и кадастрового обеспечения и реализуется силами ученых и специалистов Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестра).

Решение вопросов дальнейшего развития государственной (национальной) геодезической системы координат должно вестись с учетом геотектонической структуры территории России и возможностями передачи наблюдений в единый центр обработки в режиме реального времени. Увеличение числа постоянно действующих пунктов ФАГС, при условии выбора их местоположения в соответствии с геотектонической структурой, позволит, с одной стороны, более детально учитывать влияние этих региональных деформационных процессов на точность государственной системы координат, с другой стороны, регистрация региональных характеристик движения земной поверхности даст ценную информацию для анализа этих процессов их последующего моделирования и прогнозирования [7].

Обе государственные системы координат ПЗ-90.11 и ГСК-2011 имеют свою многолетнюю историю развития в рамках компетенции оборонного и гражданского ведомств Российской Федерации. Каждая из систем имеет свои уникальные особенности и не заменяет одна другую. В этой связи, примером из международной практики является отсутствие статуса национальной у WGS84 и наличие национальных систем координат у государств с большой территорией.

Литература / Reference

1. ГЛОНАСС и геодезия. / А. Е. Алтынов, А. А. Басманов, Б. В. Бровар и др. Под общей редакцией Г. В. Демьянова, Н. Г. Назаровой, В. Б. Непоклонова, Г. Г. Побединского, Л. И. Яблонского. – М.: Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, 2016. – 272 с. ISBN 978-5-903547-19-7. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27133277>. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=008654596>
2. Кашин Л. А. Построение классической астрономо-геодезической сети России и СССР (1816-1991 гг.): научно-технический и исторический обзор. – Москва. – Картгеоцентр – Геодезиздат. - 1999. - 192 с. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=003035089>
3. Обиденко В. И., Побединский Г. Г. Изменение метрических параметров объектов на территории Российской Федерации при переходе к ГСК-2011 // Геодезия и картография. - 2016. - № 10. – с. 12-21. DOI: [10.22389/0016-7126-2016-916-10-12-21](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-916-10-12-21).
4. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Специализированный справочник. ВТУ ГШ ВС РФ. 2-е изд. - Москва. – 2020 г. – 64 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf>
5. Побединский Г. Г, Кафтан В. И., Савиных В. П. Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании (окончание) // Геопрофи. - 2020. - № 4. – с. 47 – 50. ISSN 2306-8736. <http://www.geoprofi.ru/opinion/globalnaya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdanii-okonchanie>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44068409>
6. Побединский Г. Г, Кафтан В. И., Савиных В. П. Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании (начало) // Геопрофи. - 2020. - № 3. – с. 42 – 51. ISSN 2306-8736. <http://www.geoprofi.ru/opinion/globalnaya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdanii-nachalo>

- sozdaniy.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44068288>
7. Побединский Г. Г., Кафтан В. И. Системы координат глобальные, континентальные, региональные, национальные: состояние, проблемы, перспективы. // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». – 2020. - № 3. – с. 4 - 59. ISSN: 2223-0831. <http://geo-science.ru>.
<http://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience-32020-lite.pdf>.
 8. Попадъев В. В., Ефимов Г. Н., Зубинский В. И. Геодезическая система координат 2011 года. // В сб.: Астрономия, геодезия и геофизика. М.: Изд-во ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2018. ISBN 978-5-903547-23-4 - с. 139-228.
 9. Программный документ рабочей группы подкомитета по геодезии Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией «Соответствующие механизмы управления для поддержания глобальной геодезической системы координат». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ggim.un.org/meetings/GGIM-committee/9th-Session/documents/GGRF_Position_Paper_%20russian_web.pdf
 10. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» (A/RES/69/266), принятая 26 февраля 2015 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ggim.un.org/documents/A_RES_69_266_R.pdf
 11. Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Metivier, and X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, Journal of Geophysical Research: Solid Earth. - Volume 121, Issue 8, p. 6109-6131 doi:[10.1002/2016JB013098](https://doi.org/10.1002/2016JB013098).
 12. Bazlov Y.A., Galazin V.F., Kaplan B.L., Maksimov V.G., Rogozin V.P., (1999) GLONASS to GPS, a new coordinate transformation. GPS World, 10(1), 54-58.
 13. Boucher C., Altamimi Z. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters. Journal of Geodesy (2001) 75: 613-619.
 14. Boucher, C., and Z. Altamimi (1996), International Terrestrial Reference Frame, GPS World, 7, pp. 71-74.
<https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
 15. Kovalevsky J., Mueller I.I., Kolaczek B. Reference Frames in Astronomy and Geophysics. (Astrophysics and Space Science Library, V.154) Dodrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1989. 474
<https://www.springer.com/gp/book/9780792301820#aboutBook>
 16. Me´tivier L., Altamimi Z., Rouby H. Past and present ITRF solutions from geophysical perspectives, Advances in Space Research, Volume 65, Issue 12, 15 June 2020, Pages 2711-2722
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.031>
 17. Moritz H., 1980. Geodetic reference system 1980. Bulletin Ge´ode’sique, 54, 395–405.
 18. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) Standardization Document. Department of Defense. World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. 2014-07-08. Version 1.0.0. NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84. (Документ по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки Министерства обороны США. Общеземная система координат (геодезическая система) 1984 года. Определение и связь с локальными системами координат (геодезическими системами). 2014-07-08. Версия 1.0.0. NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84). Electronic resource.] – URL: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf
 19. National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018 / Gerasimenko M., Gorshkov V., Kaftan V., Kosarev N., Malkin Z., Mazurov B., Pasynok S., Pobedinsky G., Popadev V., Savinykh V., Sermyagin R., Shestakov N., Steblov G., Sugaipova L., Ustinov A. Ed. by V. P. Savinikh and V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, Vol. 7, No. 1, BS7003, GCRAS Publ., Moscow. – 2019. – 99 pp. doi: [10.2205/2019IUGG-RU-IAG](https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG).
<http://www.iugg.org/members/nationalreports/>.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1907/1907.10584.pdf>.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=39583717>



STATE COORDINATE SYSTEMS: ANALYSIS OF THE STATE AND PROSPECTS

Kaftan V.I. ¹

Pobedinsky G.G. ²

Savinykh V.P. ³

Stoliarov I.A. ⁴

¹ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Russia

² Russian society of geodesy, cartography and land management, Russia

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

⁴ Federal Scientific-Technical Center of Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure, Russia

E-mail: kaftan@geod.ru

Abstract: *The paper considers three implementations of global (all-Earth) coordinate systems (reference) ITRF, WGS-84 and PZ-90. It is shown that highly developed countries with a large territory create national satellite geodetic networks that implement national coordinate systems. The substantiation of the need to maintain and develop the national state geodetic coordinate system GSK-2011 for geodetic and cartographic work on the territory of the country, with the simultaneous participation of the Russian Federation in the creation of a worldwide geodetic coordinate system (reference) at the initiative of the United Nations, is given.*

Keywords: *geodetic coordinate systems, reference systems, international cooperation, state geodetic support.*

© Коллектив авторов, 2022



ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА PRECISE POINT POSITIONING ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАДАСТРОВЫХ РАБОТ НА ЗАЛЕСЕННОЙ МЕСТНОСТИ

Щенова Д.С.¹

Мельников А.Ю.¹

¹ Российский университет дружбы народов

E-mail: melnikov-ayu@rudn.ru

Аннотация: В работе изучается возможность применений метода высокоточных координатных определений precise point positioning (PPP) для выполнения ГНСС наблюдений в сложных условиях (в рамках данного исследования – на залесенной территории) в целях создания съёмочного обоснования для выполнения кадастровых работ. В рамках исследований были проведены ГНСС наблюдения в режиме статики на линейном базисе, часть пунктов которого находится в лесу. Продолжительность наблюдений на каждом пункте – один час. Результаты наблюдений были обработаны методом PPP при помощи веб-сервиса CSRS-PPP и классическим относительным методом при помощи ПО Topcon Tools. Результаты обработки каждым методом сравнивались с параметрами линейного базиса, принятыми в качестве эталонных. Оба метода на открытой местности демонстрируют результаты, соответствующие требованиям точности геодезического обеспечения кадастровых работ. В сложных условиях наблюдений точность обоих методов, для выбранного временного интервала наблюдений, не соответствует точности геодезического обеспечения кадастровых работ. Сделано заключение, что по результатам данного эксперимента, не следует рекомендовать метод PPP для геодезического обеспечения кадастровых работ в сложных условиях для ГНСС-наблюдений продолжительностью один час. Представлены предложения по улучшению эксперимента для дальнейшей работы.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС, спутниковые методы, метод высокоточного позиционирования, precise point positioning, PPP, постобработка ГНСС наблюдений, кадастровые работы.

Введение

В настоящее время при проведении геодезических работ для определения координат границ объектов, подлежащих кадастровому учету, как правило, требуется сантиметровая точность. Для решения данной задачи широкое распространение получили Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). При использовании спутниковых технологий в кадастре необходимый уровень точности обеспечивает относительный метод определения координат. Однако он имеет ряд недостатков, которые обуславливаются во-первых: необходимостью наличия двух дорогостоящих ГНСС-приемников, а во-вторых: тем, что один из приемников устанавливается на базовой станции с известными координатами [1].

Стремительное развитие ГНСС технологий привело к возникновению метода Precise Point Positioning [5, 6],

который в настоящее время по точности близок к относительному методу [3], при этом для определения координат точки требуется лишь один комплект спутниковой аппаратуры.

Целью данного исследования является изучение возможности применения метода Precise Point Positioning для геодезического обеспечения кадастровых работ на залесенной местности. Актуальность исследования заключается в том, что при проведении полевых геодезических работ кадастровый инженер часто сталкивается на своем пути с разного рода препятствиями, одним из которых является наличие густой растительности на территории, где проводится съёмка.

Программа наблюдений

Для оценки возможности применения метода PPP в сложных условиях наблюдений был выбран эталонный линейный базис геодезического учебного

полигона «Чкаловский» Государственного университета по землеустройству, расположенного в городском округе Лосино-Петровский Московской области (рис. 1).

Базис состоит из девяти геодезических пунктов, из которых для

выполнения исследований было выбрано шесть: пункты Б-20, Б-624, Б-768 находятся на открытой местности с благоприятными условиями для наблюдений, пункты Б-0, Б-240, Б-360 находятся в местах с осложненными условиями для наблюдений.

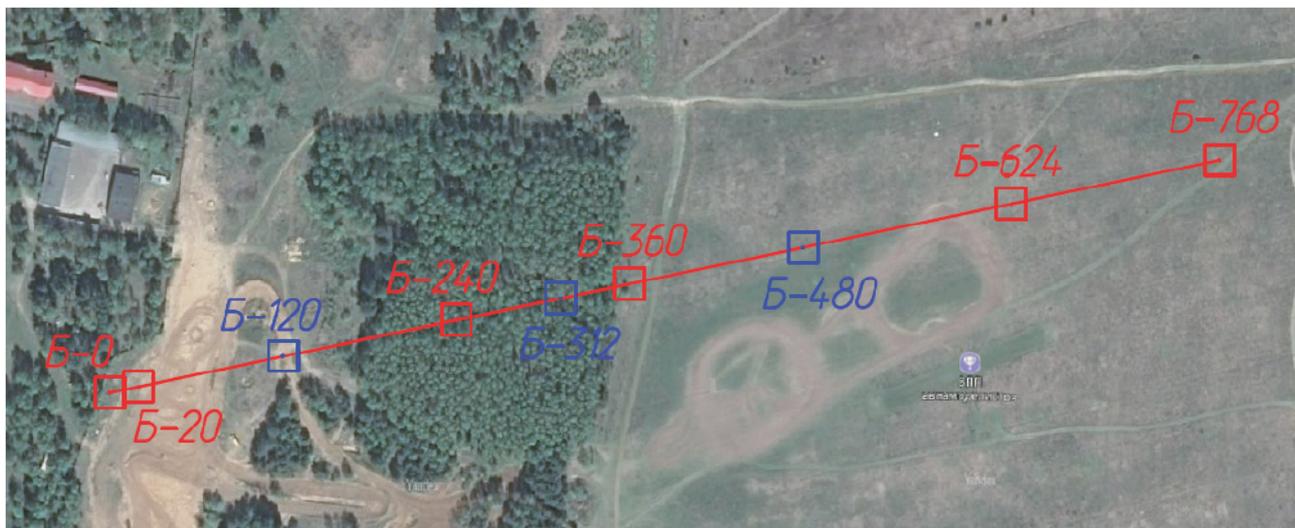


Рис. 1. Эталонный линейный базис

Для выполнения исследования было принято решение установить один приемник на открытой местности в качестве базового и осуществлять непрерывные наблюдения на данном пункте (Б-20) в течение всего периода исследования, второй приемник поочередно перемещать по другим пяти выбранным пунктам. Таким образом, были выполнены синхронные наблюдения на пяти линиях полигона: Б-20 – Б-0, Б-20 – Б-240, Б-20 – Б-360, Б-20 – Б-624, Б-20 – Б-768. Продолжительность сеанса наблюдений была выбрана равной одному часу, как наиболее распространенная при спутниковых наблюдениях для геодезического обеспечения кадастровых работ.

В наблюдениях участвовали два ГНСС приемника: South S-82 и Javad Махор (CR-G3). Приемник South S-82 был установлен на пункте Б-20 (рис. 2а) в течение всего периода наблюдений, Javad Махор перемещался по выбранным пунктам базиса (рис. 2б – 2г). Схема сеансов наблюдений представлена на рис. 3.

Обработка результатов полевых наблюдений

Оценку возможности применения метода PPP в сложных условиях наблюдений было принято решение выполнять в сравнении результатов обработки одних и тех же измерений методом PPP и классическим относительным методом с применением двойных фазовых разностей, а также в сравнении с эталонными значениями приращений координат линий базиса.

Обработка результатов наблюдений методом PPP выполнялась при помощи веб-сервиса CSRS-PPP [<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>] Министерства природных ресурсов Канады. Обработка выполнялась для синхронных часовых наблюдений на двух пунктах базиса одновременно, одним из которых каждый раз становился пункт Б-20, наблюдения на котором выполнялись непрерывно в течение всей программы наблюдений (рис. 3).



Рис. 2а Приемник South S-82 на пункте Б-20



Рис. 2б Приемник Javad Махор на пункте Б-0



Рис. 2в Приемник Javad Махор на пункте Б-240



Рис. 2г Приемник Javad Махор на пункте Б-768

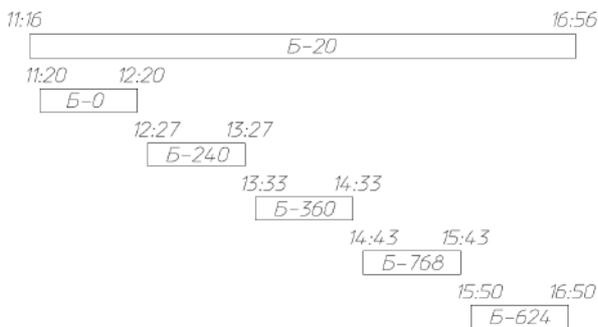


Рис. 3 Временная схема сеансов наблюдений

Для этого файл наблюдений на пункте Б-20 был «разрезан» на часовые файлы, синхронизированные по времени с наблюдениями на других пунктах. Сервис предоставляет данные в формате геодезических координат (B, L, H ell.) и плоских прямоугольных координат в проекции UTM (North, East), СКО положения каждой точки представлены в формате плоских прямоугольных координат (m_N, m_E, m_H) (рис. 4). При обработке использовалась самая точная эфемеридно-временная информация (final).

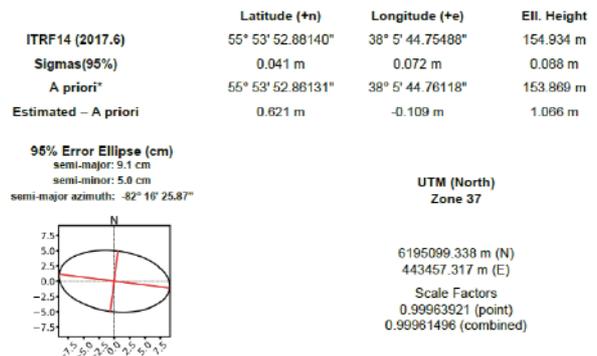


Рис. 4 Фрагмент отчета по обработке ГНСС наблюдений, предоставляемого веб-сервисом CSRS-PPP

Полученные координаты при помощи геодезического калькулятора ПО Торсон Tools были преобразованы в систему координат СК-42, так как координаты пунктов базиса были представлены именно в данной системе. СКО полученных значений координат представлены в табл. 1, результаты сравнения полученных приращений координат базисных линий с эталонными значениями представлены в табл. 2.

Таблица 1

СКО положения точек базисной линии по результатам обработки наблюдений методом PPP

Линия	Точка	СКО, м		
		m _N	m _E	m _H
1 (11:20 - 12:20)	Б -20	0.046	0.112	0.200
	Б - 0	0.041	0.147	0.236
2 (12:27 - 13:27)	Б -20	0.082	0.074	0.193
	Б - 240	0.647	0.519	1.660
3 (13:33 - 14:33)	Б -20	0.047	0.101	0.137
	Б - 360	0.047	0.100	0.136
4 (14:43 - 15:43)	Б -20	0.058	0.081	0.167
	Б - 624	0.041	0.072	0.088
5 (15:50 - 16:50)	Б -20	0.037	0.071	0.096
	Б - 768	0.037	0.071	0.082

Как видно из сравнения результатов обработки наблюдений методом PPP (в случае синхронных наблюдений) с эталонными значениями, когда оба ГНСС приемника выполняли

наблюдения на открытой местности (линии Б-20 – Б-624 и Б-20 – Б-768) отклонение приращений координат базовых линий не превышают 1,5 см, а расхождения в превышениях носят едионаправленный характер, что может говорить о, возможно, некорректном учете высоты фазового центра антенны сервисом обработки ГНСС наблюдений, или о существенном влиянии ионосферной задержки, так как время выполнения данного сеанса (полдень) совпадает с пиком влияния ионосферной задержки на результаты наблюдений (рис. 5).

Таблица 2

Расхождение полученных параметров базовых линий по результатам обработки наблюдений методом PPP и эталонных значений

Линия	Разности, м (PPP – эталон)				
	ΔN	ΔE	h	S	D
Б-20 – Б-0	-0.006	0.054	0.583	-0.052	-0.031
Б-20 – Б-240	0.448	0.249	0.146	0.333	0.330
Б-20 – Б-360	0.002	-0.009	-0.014	-0.009	-0.008
Б-20 – Б-624	-0.013	-0.009	0.114	-0.011	-0.012
Б-20 – Б-768	-0.001	-0.002	0.111	-0.002	-0.003

При этом следует отметить, что для линии Б-20 – Б-360, один из пунктов которой находится на кромке леса, в условиях наблюдений близких к сложным, результаты наблюдений получились наиболее близкие к эталонным.

На линиях Б-20 – Б-0 и Б-20 – Б-240 вторые пункты которых расположены в сложных условиях наблюдений, результаты получились достаточно низкого качества, не соответствующие допустимым значениям, при этом следует отметить, что пункты Б-0 и Б-20 находятся на расстоянии всего 20 м друг от друга (рис. 6).

Для более качественной оценки было принято решения также сравнить результаты обработки наблюдений

методом PPP (в случае синхронных наблюдений) с результатами обработки этих же наблюдений классическим относительным методом.

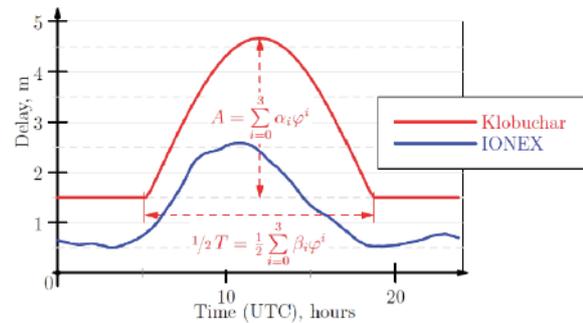


Рис. 5 Сравнение модели Клобушара [4] с данными ионосферных карт [2]



Рис. 6. Взаимное расположения Б-0 и Б-20

Обработка относительных наблюдений выполнялась в двух вариантах. Оба варианта включали синхронные наблюдения на трех пунктах: MDVJ, Б-20, один из пунктов базиса (Б-х). Однако в первом варианте базисный вектор, соединяющий пункт Б-20 и Б-х, из обработки исключался (рис. 7а), во втором случае данный вектор был включен в обработку (рис. 7б). Первый вариант был необходим непосредственно для сравнения результатов обработки ГНСС-наблюдений методом PPP с результатами обработки относительных наблюдений для одних и тех же пунктов на

одном и том же временном интервале. Второй вариант, как заведомо более точный, был предназначен для оценки качества наблюдений в целом.

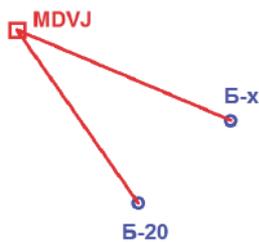


Рис. 7а Раздельные носительные ГНСС-наблюдения

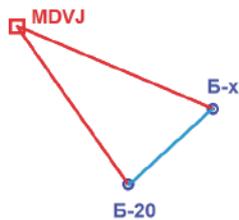


Рис. 7б Совместные относительные ГНСС-наблюдения

Оценка стабильности базовой станции

В качестве базовой станции для обработки результатов наблюдений относительным методом (двойных фазовых разностей) была выбрана постояннодействующая базовая станция Менделеево (MDVJ), расположенная на предельно

допустимом расстоянии для обработки ГНСС наблюдений коммерческим ПО (56 км) от района выполнения исследований. Базовая станция входит в сеть Международной геодезической службы (IGS) и имеет накопленные результаты наблюдений в открытом обменном формате RINEX более чем за 20 лет.

Для оценки стабильности положения базовой станции был проведен анализ временного ряда координат в год выполнения исследований, результаты представлены в табл. 3. Ряд координат был получен по результатам обработки суточных ГНСС-наблюдений Геодезической лабораторией Невады (Nevada Geodetic Laboratory) при помощи ПО GIPSY/OASIS-II в автоматическом режиме [<http://geodesy.unr.edu/index.php>]. В таблице представлены координаты станции на последнее число каждого месяца года выполнения исследований, а также на четыре дня до и после даты выполнения исследований.

Таблица 3

Оценка стабильности положения базовой станции MDVJ

Дата	X	Y	Z	m _x	m _y	m _z
JAN31	2845455.811	2160954.380	5265993.280	0.001	0.001	0.002
FEB28	2845455.814	2160954.388	5265993.290	0.001	0.001	0.002
MAR31	2845455.809	2160954.387	5265993.283	0.001	0.001	0.002
APR30	2845455.807	2160954.390	5265993.288	0.001	0.001	0.002
MAY31	2845455.808	2160954.393	5265993.291	0.001	0.001	0.003
JUN30	2845455.807	2160954.395	5265993.300	0.002	0.002	0.004
JUL27	2845455.803	2160954.397	5265993.297	0.002	0.001	0.003
JUL28	2845455.807	2160954.395	5265993.299	0.001	0.001	0.002
JUL29	2845455.803	2160954.395	5265993.302	0.001	0.001	0.002
JUL30	2845455.805	2160954.398	5265993.305	0.001	0.001	0.002
JUL31	2845455.808	2160954.398	5265993.300	0.001	0.001	0.002
AUG01	2845455.800	2160954.394	5265993.292	0.001	0.001	0.002
AUG02	2845455.803	2160954.395	5265993.295	0.001	0.001	0.002
AUG03	2845455.803	2160954.396	5265993.294	0.001	0.001	0.002
AUG04	2845455.804	2160954.396	5265993.297	0.001	0.001	0.002
SEP30	2845455.797	2160954.394	5265993.290	0.001	0.001	0.002
OCT30	2845455.805	2160954.405	5265993.313	0.001	0.001	0.002
NOV30	2845455.790	2160954.396	5265993.287	0.001	0.001	0.002
DEC30	2845455.796	2160954.399	5265993.296	0.001	0.001	0.002

Как видно из таблицы, положение станции в течение года, для уровня точности геодезического обеспечения

кадастровых работ, остается стабильным. Поэтому координаты базовой станции на дату 31 июля (после

преобразования с СК-42) были приняты в качестве исходных для обработки ГНСС-наблюдений в ПО Torson Tools.

Раздельная обработка относительных ГНСС-наблюдений

Для раздельной обработки ГНСС-наблюдений результаты наблюдений в формате RINEX были загружены в ПО Torson Tools. Базовый вектор, соединяющий пункт Б-20 и другой пункт базисной линии, из обработки был удален (рис. 8),

а также для пункта Б-20 были исключены из обработки все спутники на интервале наблюдений, превышающем совместные наблюдения на втором пункте базиса (рис. 9). По итогам обработки результатов наблюдений на каждой паре пунктов были получены СКО координат пунктов, представленные в табл. 4. Результаты сравнения разностей (приращений) координат пунктов с их эталонными значениями представлены в табл. 5.

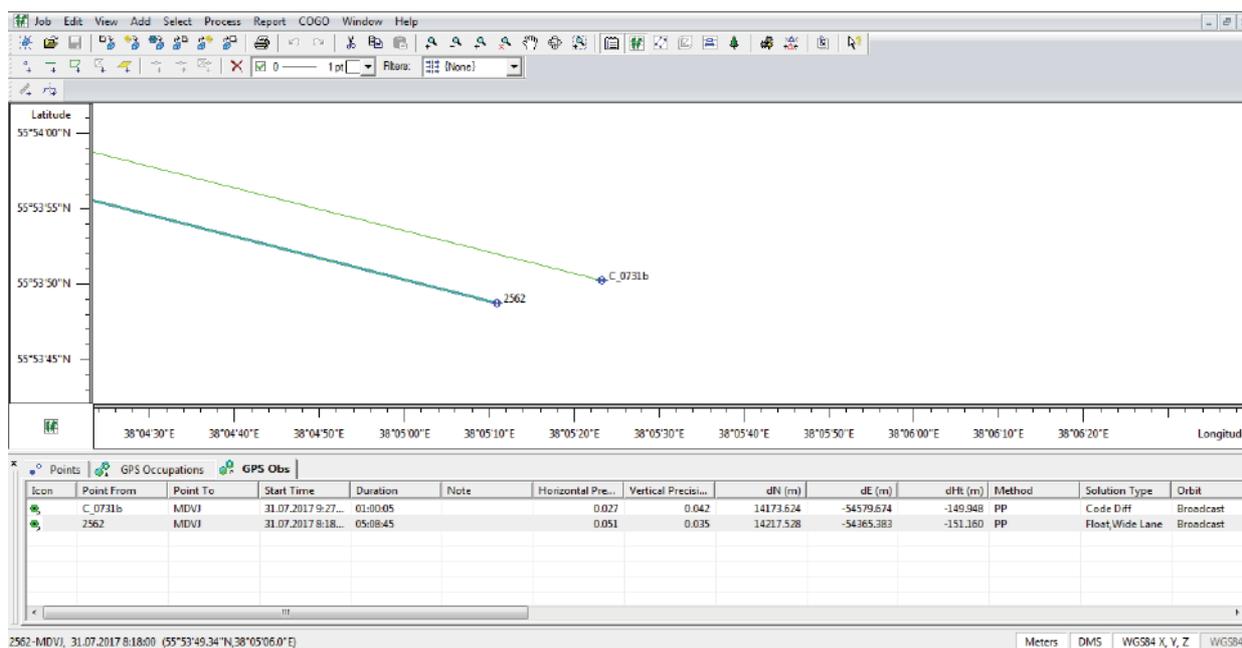


Рис. 8 Пример раздельных синхронных ГНСС-наблюдений

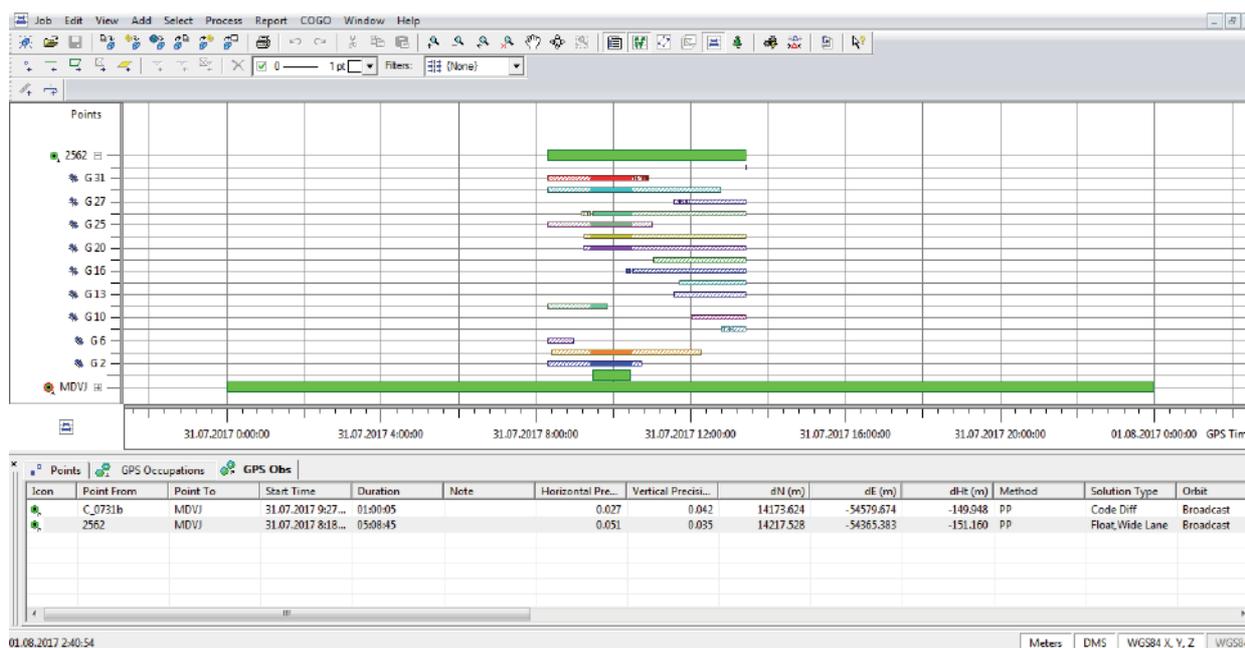


Рис. 9 Исключение из обработки излишних результатов наблюдений.

Таблица 4

СКО положения точек базисной линии по результатам обработки отдельных наблюдений относительным методом

Линия	Точка	СКО, м		
		m _N	m _E	m _H
1 (11:20 - 12:20)	Б -20	0.042	0.034	0.071
	Б - 0	0.353	0.234	0.597
2 (12:27 - 13:27)	Б -20	0.031	0.040	0.035
	Б - 240	0.022	0.015	0.042
3 (13:33 - 14:33)	Б -20	0.017	0.006	0.043
	Б - 360	0.018	0.007	0.047
4 (14:43 - 15:43)	Б -20	0.159	0.191	0.151
	Б - 624	0.197	0.223	0.181
5 (15:50 - 16:50)	Б -20	0.066	0.087	0.071
	Б - 768	0.080	0.115	0.109

Таблица 5

Расхождение полученных параметров базовых линий по результатам обработки отдельных наблюдений относительным методом и эталонных значений

Линия	Разности, м (PPP – эталон)				
	ΔN	ΔE	h	S	D
Б-20 – Б-0	-0.315	0.294	0.693	-0.223	-0.196
Б-20 – Б-240	0.329	0.016	1.575	0.081	0.054
Б-20 – Б-360	0.002	-0.005	0.010	-0.004	-0.005
Б-20 – Б-624	-0.015	0.002	0.044	-0.001	-0.002
Б-20 – Б-768	-0.035	-0.010	0.046	-0.016	-0.017

Как можно видеть из результатов обработки наблюдений относительным методом, для линий, обе точки которых расположены на открытой местности, расхождение приращений координат с их эталонными значениями также соответствуют допускам для кадастровых работ, однако, даже превышают значения расхождений, полученных в результате обработки методом PPP. При этом

СКО точек для сеанса наблюдений линии Б-20 – Б-624 получились существенно выше допуска и имеют одинаковый порядок, что говорит о высокой степени коррелированности синхронных измерений даже для случая, когда они совместно не обрабатывались. Для линий, одна из точек которых расположена в сложных условиях наблюдений, отклонения значений приращений координат от эталонных получились достаточно существенными, а отклонения в превышении для линии Б-20 – Б-240 составили 1,5 метра, что в три раза превышает расхождения для данной линии, полученные в методе PPP и говорит о существенных ошибках.

Результаты в целом показывают, что относительный метод и метод PPP по точности являются сравнимыми, а в некоторых случаях метод PPP показывает лучший результат. Возможно, результаты обработки относительным методом при тех же условиях наблюдений могли бы показать большую точность, если бы расстояние до базовой станции было меньше, и не превышало рекомендованных инструкцией [7] 15 – 30 км. Однако, если сравнивать с методом PPP, то данный метод применяется чаще как раз в тех случаях, когда расстояние до ближайшей базовой станции достаточно велико или базовые станции в районе проведения работ отсутствуют совсем, поэтому в данном случае такой выбор базовой станции соответствует задачам исследования.

Совместная обработка относительных ГНСС-наблюдений

Совместная обработка относительных ГНСС-наблюдений в ПО Topcon Tools осуществлялась по тому же алгоритму, как и отдельная, однако, ни один из векторов из обработки не исключался (рис. 10). Таким образом, обрабатывался и уравнивался классический ГНСС – треугольник (рис. 7б), один из пунктов которого (MDV) принимался в качестве исходного.

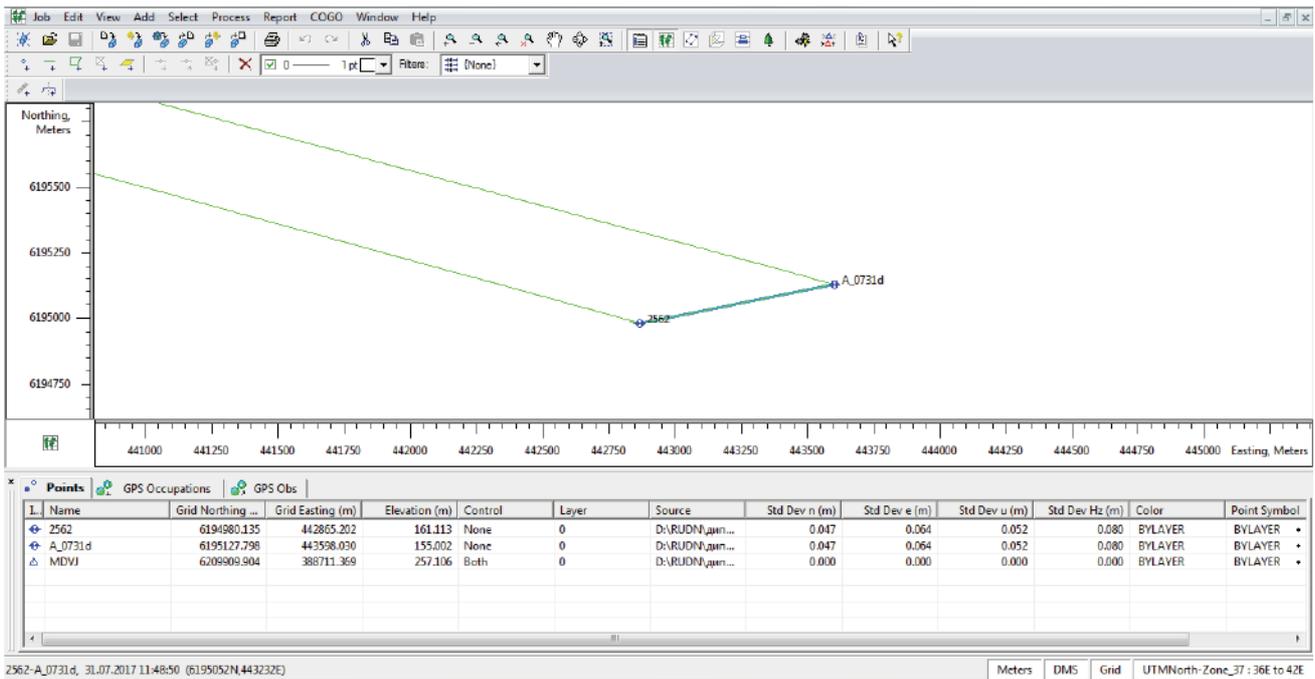


Рис. 10 Пример совместной обработки синхронных ГНСС-наблюдений

По итогам обработки результатов наблюдений на каждой паре определяемых пунктов базиса были получены СКО координат пунктов, представленные в табл. 6. Результаты сравнения разностей (приращений) координат пунктов с их эталонными значениями представлены в табл. 7.

Таблица 6

СКО положения точек базисной линии по результатам совместной обработки наблюдений относительным методом

Линия	Точка	СКО, м		
		m _N	m _E	m _H
1 (11:20 – 12:20)	Б -20	0.040	0.033	0.068
	Б - 0	0.040	0.033	0.068
2 (12:27 – 13:27)	Б -20	0.031	0.040	0.035
	Б - 240	0.031	0.040	0.035
3 (13:33 – 14:33)	Б -20	0.012	0.005	0.032
	Б - 360	0.012	0.005	0.032
4 (14:43 – 15:43)	Б -20	0.174	0.185	0.165
	Б - 624	0.174	0.185	0.165
5 (15:50 – 16:50)	Б -20	0.047	0.064	0.052
	Б - 768	0.047	0.064	0.052

Таблица 7

Расхождение полученных параметров базовых линий по результатам обработки совместных наблюдений относительным методом и эталонных значений

Линия	Разности, м (PPP – эталон)				
	ΔN	ΔE	h	S	D
Б-20 – Б-0	0.015	0.040	0.039	-0.042	-0.041
Б-20 – Б-240	-0.001	0.013	0.046	0.013	0.012
Б-20 – Б-360	0.003	-0.005	0.044	-0.005	-0.006
Б-20 – Б-624	-0.005	-0.005	-0.029	-0.006	-0.006
Б-20 – Б-768	-0.001	-0.009	0.080	-0.009	-0.010

Как видно из табл. 6 СКО точек каждой пары совместно обрабатываемых пунктов базиса получились одинаковые, независимо от условий наблюдений на пунктах, это демонстрирует одно из преимуществ совместной обработки. При этом СКО точки Б-20 в каждом для каждого сеанса часовых наблюдений по результатам совместной обработки получились разные, но сравнимые по точности и практически соответствующие

СКО, полученным при отдельной обработке наблюдений.

Разности приращений координат, в сравнении с эталонными, не превышают 4 см в плане и 8 см по высоте, что в целом соответствует точности геодезического обеспечения кадастровых работ. Однако для пары точек Б-20 – Б-0, при условии, что расстояние между пунктами составляет всего 20 метров, полученные значения нельзя считать допустимыми. Очевидно, что в данном случае существенное влияние на снижение точности результатов наблюдений оказала точка Б-0, расположенная в неблагоприятных условиях (рис. 2б, 6). В то же время, для пары точек Б-20 – Б-624 СКО получились существенно выше нормы, несмотря на то, что обе точки находились на открытой местности, при этом полученные разности приращений координат для данной линии с эталонными значениями составили по 5 мм в плане и 3 см по высоте.

В целом результаты совместной обработки ГНСС-наблюдений относительным методом, с учетом условий и продолжительности интервала наблюдений, можно считать удовлетворительными, что еще раз подтверждает преимущество данного метода в рассматриваемых условиях.

Заключение

Так как основной задачей данного исследования является оценка возможности применения именно метода PPP в сложных условиях наблюдений, следует помнить, что главным преимуществом данного метода является его автономность, т.е. возможность использовать для наблюдений только один комплект ГНСС-аппаратуры. Использование одного комплекта ГНСС-аппаратуры исключает возможность применять методику совместной обработки (рис. 7б). Поэтому в данном исследовании корректным будет сравнивать результаты обработки наблюдений методом PPP с результатами отдельной обработки

наблюдений относительным методом (рис. 7а). Анализ данного сравнения показывает, что оба метода демонстрируют практически одинаковый порядок значений отклонений от эталонов и СКО. Оба метода на открытой местности демонстрируют результаты, соответствующие требованиям точности геодезического обеспечения кадастровых работ. В сложных условиях наблюдений точность обоих методов, для выбранного временного интервала наблюдений, не соответствует точности геодезического обеспечения кадастровых работ. Таким образом, по результатам данного эксперимента, рекомендовать метод PPP для геодезического обеспечения кадастровых работ в сложных условиях для ГНСС-наблюдений с интервалом наблюдений, продолжительностью один час, не следует. Тем не менее ввиду того, что метод PPP продолжает развиваться, в перспективе необходимо провести дополнительные исследования с увеличенным интервалом наблюдений, с применением более современной спутниковой аппаратуры, позволяющей принимать сигнал от спутников 3 и более ГНСС, а также выполнить повторные эксперименты в течение нескольких дней подряд для проведения статистического анализа получаемых результатов.

Литература / Reference

1. Виноградов А.В., Войтенко А.В., Жигулин А.Ю. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах – Омск.: Геопрофи, 2010. – 27-30 с.
2. Кириенко Ю. Атмосферные задержки GNSS-сигнала // [технический отчет], 2016 // DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.3398539
3. Мельников А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинимических исследованиях, Известия высших учебных заведений. Геодезия и

- аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 6. С. 605-615. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-6-605-615
4. Klobuchar, J., 1987. Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (3), pp. 325-331. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829
 5. Kouba J., Heroux P., GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products, GPS Solutions, 2001, vol.5, pp. 12-28, doi.org/10.1007/PL00012883
 6. Zumberge, J. F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks / J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins et al, Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). – 1997. – Т. 102. – № В3. – 5005–5017 с. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>
 7. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02 Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS.



STUDY OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF THE PRECISE POINT POSITIONING METHOD FOR GEODETIC SUPPORT OF CADASTRAL WORKS IN FORESTED AREAS

*Shenova D.S.*¹

*Melnikov A.Yu.*¹

¹ RUDN University, Russia

E-mail: melnikov-ayu@rudn.ru

Abstract: The paper evaluates the possibility of using the precision positioning method (PPT) for GNSS observations in difficult conditions (in the framework of this study, in a forest area) to create survey points for performing cadastral work. As part of the research, GNSS observations were carried out in a static mode on a linear base, part of which is located in the forest. The observation duration is one hour for all points. The results were processed by the PPP method using the CSRS-PPP web service and by the classical relative method using the Topcon Tools software. The results of processing by each method were compared with the parameters of the linear basis used as a reference. For both methods in the open field the equal results is obtained and corresponds the precision for geodetic support of cadastral work. In conditions that are difficult to observe, for a one-hour observation interval, both method are not obtained the results, which corresponds the precision for geodetic support of cadastral work. It is concluded that, based on the results of this experiment, the PPP method should not be recommended for geodetic support of cadastral work in difficult conditions with a duration of GNSS observations of less than one hour. Proposals on the prospects of the experiment for further work are made.

Keywords: global navigation satellite systems, GNSS, precise point positioning, PPP, GNSS post-processing, cadastral works.

© Щенова Д.С., Мельников А.Ю., 2022

ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ В ГЕОДЕЗИИ

Бровар Б.В.¹

Кафтан В.И.²

Нейман Ю.М.³

¹ ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных»

² Геофизический центр РАН

³ Московский государственный университет геодезии и картографии

E-mail: bvbrovar@rambler.ru

E-mail: kaftan@geod.ru

E-mail: yuney@miigaik.ru

Аннотация: *Сегодня как никогда остро встает проблема оскудения отечественной геодезии в ее научном аспекте. Последние десятилетия этому научному направлению не уделялось достаточно внимания со стороны органов государственного управления. Отечественная отрасль геодезии и картографии потеряла свое самостоятельное значение, что недопустимо для крупнейшего и высокоразвитого государства. Эти обстоятельства отразились на уровне подготовки профессиональных, а следовательно, и научных кадров. Уровень отечественной геодезической науки стал катастрофически снижаться. В представленной публикации сделана попытка проанализировать состояние науки и образования геодезии на примере одной из докторских диссертаций. Отмечена необходимость большего внимания государства к этой научной области, как важнейшего элемента государственной инфраструктуры.*

Ключевые слова: *геодезия, наука, образование, защита диссертации.*

Введение

В последние десятилетия, в нашей стране, есть основания говорить о критическом состоянии отечественной геодезической науки. Это обусловлено, во-первых, прекращением существования государственной геодезии и картографии, как самостоятельной отрасли экономики, во-вторых, реформированием высшего и среднего образования за счет прекращения функционирования кафедр геодезии в целом ряде высших учебных заведений и сокращения топографо-геодезических техникумов. В прошлом столетии основными научными подразделениями, развивающими геодезическую науку, были отраслевые институты Центральный НИИ геодезии, аэросъемки и картографии, Институт прикладной геодезии, целый ряд ведущих ВУЗов страны, академические астрономические и геофизические институты. Главные достижения в фундаментальной и основной геодезии связаны с именами М.С. Молоденского и Ф.Н. Красовского. Первые отечественные модели фигуры Земли были созданы А.А. Изотовым, В.В. Броваром, Л.П. Пеллиным и др. Ныне многие из перечисленных научных учреждений не существуют или реформированы путем подчинения их

ведомствам, имеющим косвенное отношение к геодезии.

Перечисленные обстоятельства приводят к деградации отечественной геодезической науки, что выражается в плохой подготовке специалистов и исследователей. Геодезической отраслью начинают управлять далекие от геодезии специалисты. Геодезию в ВУЗах и техникумах стали преподавать выпускники с плохой геодезической подготовкой. Это приводит к тому, что даже паспорт специальности «геодезия» Высшей аттестационной комиссии стал содержать задачи, не свойственные геодезии. В то же время приятно осознавать, что сегодня, в процессе совершенствования паспортов специальностей, геодезию, наконец-то, стали относить к физико-математическим наукам, каковой и является ее фундаментальная основа. Тем не менее, остается проблема преобразования диссертационных советов по специальности «геодезия» из-за сформировавшейся трудности привлечения докторов наук из этой отрасли.

Настоящая публикация посвящена анализу состояния отечественной геодезической науки на примере одной из «докторских» диссертаций, недавно

представленных к защите по специальности «геодезия».

Анализ состояния науки и образования на примере недавней «докторской» диссертации

К сожалению, со временем проблема заметно усугубляется. Уровень кандидатских и докторских диссертаций катастрофически падает. Растёт количество людей, не имеющих, по сути своей, отношения к геодезической науке, но желающих получить ученую степень. При этом сомнения и постоянная перепроверка своих результатов, свойственные настоящим исследователям, заменяются написанием наукообразной пустоты и упорством в добыче различных «положительных» отзывов. Беззастенчивость таких соискателей хорошо сочетается с полным безразличием дающих отзывы и большинства членов Учёного совета. Каноническим примером такой ситуации является защита докторской (!) диссертации «Разработка теоретических и технологических основ комплексного геодезического обеспечения устойчивого развития территорий» (автор В.В.Ознамец), состоявшаяся 21 декабря 2021 года в нашем ведущем ВУЗе – Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) [Ознамец, 2021]. Автореферат написан таким образом, что понять суть дела не представляется возможным – всё тщательно замаскировано неинформативным пустословием. По-видимому, автор уверен, что наука – это умение выражаться «научно» (то есть с помощью множества редко используемых терминов) даже в тех случаях, когда сказать-то, собственно, нечего. Но в процессе защиты случилось непредвиденное – некоторые члены Учёного совета решили всё-таки выяснить: в чём же конкретный смысл многословных результатов, выносимых на защиту? И – о, ужас – диссертант сам не понимает смысла своих словесных нагромождений! Чтобы убедиться в таком парадоксе, достаточно

посмотреть хотя бы ту часть видеозаписи защиты диссертации Ознамца В.В., в которой диссертант отвечает (а точнее, не отвечает) на вопросы [https://www.miigaik.ru/science/councils/congregation/21_12_23_oznamec/oznamec_VV.mp4]. Казалось бы, о какой диссертации (тем более, докторской) может идти речь? Полное непонимание диссертантом того, что написано в его диссертации, вынуждает вспоминать о таких неприятных терминах как беззастенчивость, очковтирательство и т.п. Однако, большинство членов Учёного совета предпочли не думать о неприятном и проголосовали положительно (конечный счёт 13:3+1 бюллетень недействительный). Как говорится, дело сделано! Но что будет с геодезической наукой дальше?

Поскольку выяснилось, что диссертант не в состоянии помочь разобраться в конкретном смысле его достижений, то попробуем сделать это самостоятельно.

Диссертация соискателя [Ознамец, 2021] посвящена достаточно неопределённой теме. «Устойчивое развитие» – понятие неоднозначное и трактуется в разном контексте по-разному. В нашей стране устойчивое развитие связывается с экономическим ростом, отражаемым в увеличении внутреннего валового продукта. За рубежом это понятие связано с экологическими процессами. В значительной мере оно обусловлено ростом благосостояния общества. Переход к устойчивому экономическому развитию в научном аспекте заключается в формулировании новых эффективных экономических моделей. В качестве примера можно привести одну из многих научных публикаций, где представлена разработка многоцелевой модели помощи принятия решений, основанной на функции полезности, широко используемой в экономических исследованиях [Nechi, Aouni, Mrabet, 2020]. В работе соискателя нет определенности в отношении понятия устойчивого развития. Более того, геодезия везде и во все времена

обеспечивала именно устойчивое развитие науки, экономики, территорий и общества в целом. Это обстоятельство просто невозможно оспаривать. Отсюда следует вывод о том, что название темы диссертации совершенно не выдерживает критики. Более того, описание геодезического обеспечения именно «территорий» в рукописи просто отсутствует, равно как и теоретические и технологические основы геодезического обеспечения вообще. Декларация автора о том, что современной геодезией «недостаточно адекватно решаются новые задачи, связанные с устойчивым развитием территорий» (цитата со стр.5 автореферата [Ознамец, 2021]), абсолютно не обоснована и неприемлема. В работе нет объявленной комплексности, так как каждая частная и весьма узкая задача в ней представлена самостоятельно.

В представленной работе объединены фрагменты, имеющие отношение к геодезическому обеспечению кадастра, экологических задач, территориального управления, железных дорог, использованию радиометок RFID. Последняя новация уже рассматривалась на одном из заседаний диссертационного совета и была отвергнута, как нечто не соответствующее области геоинформатики. Теперь она почему-то возникла в рукописи с претензией уже на принадлежность к геодезии. Из описанных в диссертации решений лишь пара таковых может быть отнесена к области геодезии. Это измерение железнодорожных кривых, как альтернатива «традиционному способу измерений геометрии пути» и некие манипуляции с приведенной широтой. Следует отметить, что как геометрия железнодорожного полотна, так и геодезическое обеспечение железных дорог во всех его аспектах сегодня находятся в достойном состоянии, благодаря ученым и специалистам этой области. Работ (статей, монографий, изобретений), посвященных этой проблеме, решаемой на самом современном уровне, более чем достаточно. Можно, например,

упомануть исследования и разработки известных геодезистов С.И. Матвеева и В.А. Коугии [Матвеев, Коугия, 2013]. Расчеты элементов и разбивка железнодорожных кривых исчерпывающе рассмотрены в учебнике [Расчет элементов ..., 2008]. Как ни странно, эти работы автору диссертации неизвестны, так как он их не проанализировал и не процитировал. Остальные фрагменты рукописи имеют отношение к аэрофотограмметрии, геоинформатике, экологии, управлению и пр. Ни одно из этих «решений» не относится к области, собственно, геодезии. Исследование береговой линии водных объектов, которому посвящена одна из глав рукописи, успешно осуществляется экологами и географами. Достаточно обратиться к учебнику [Береговые процессы ..., 2018], где, в том числе, описаны технологии применения беспилотных летательных аппаратов. Соответствующие разработки, безусловно, имеются и за рубежом [Klemas, 2015]. Несмотря на основательную проработанность затронутых вопросов учеными и профессионалами, диссертант не обосновывает нужность (актуальность) каждой из представленных им «новаций». Он предлагает их как некие «альтернативные решения», не доказывая их преимущества и необходимость вообще. В тексте рукописи отсутствуют исследования современного состояния каждой из затронутых проблем. Таким образом, в рукописи представлено несколько разнородных, часто далеких от области геодезии задач, необходимость решения которых диссертантом абсолютно не обоснована. Важнейшие атрибуты диссертации – актуальность и научная новизна в представленном манускрипте [Ознамец, 2021] просто-напросто отсутствуют.

Первая глава работы, именована как «Исследование применения геодезического обеспечения», не содержит необходимого изучения состояния геодезического обеспечения по каждому из разнородных фрагментов работы. В ней не представлен, безусловно

необходимый любому научному исследованию, обзор современного состояния каждой из проблем. Создается впечатление, что в этих сферах до сих пор геодезического обеспечения совсем не существовало. Автор ограничивается многочисленными декларациями того, каким, с его точки зрения, должно быть геодезическое обеспечение, не подкрепляя это содержательными исследованиями современного состояния проблем. Рассматривая различные задачи геодезического обеспечения, соискатель ссылается (стр.15 диссертации) на собственную публикацию. Между тем, например, геодезическое обеспечение территории Российской Федерации активно развивается, и оно обеспечивает как задачи государственного управления, так и кадастра, о чем говорится, например, на интернет-сайте Росреестра¹.

Вместо изучения современного состояния геодезического обеспечения рассмотренных им локальных задач, соискатель в первой главе активно проводит ревизию современной геодезии, как науки. Им придуманы некие «оригинальные» концепции интерпретации геодезии. При этом в анализе автора фактически пропадает ее главная научная задача: изучение формы, размеров, гравитационного поля Земли и их изменений во времени, что ясно отражено в формуле специальности геодезии Паспорта ВАК.

Судя по публикациям соискателя, его представления о геодезии ограничиваются чисто геометрическими задачами. Гравитационное поле и процессы вращения Земли в своих рассуждениях и публикациях им игнорируются. При этом странно, что диссертант ссылается на книгу Петера Ваничека, являющегося известным канадским ученым в области физической геодезии, который в своем профиле социальной научной сети сегодня пишет: «I am still working on the geoid

and the theory of heights» - Я до сих пор работаю над геоидом и теорией высот. И после этого диссертант почему-то считает, что ученый, работающий в области физической геодезии, представляет ее разделом прикладной математики.

Следует заметить, что дискуссии по ревизии геодезии время от времени возникали как в России, так и за рубежом. Так, Георгию Николаевичу Тетерину, почему-то, в этой связи, не упомянутому диссертантом, принадлежит монография «Теория развития и метасистемное понимание геодезии», в которой он ограничивает, как и соискатель докторской степени [Ознамец, 2021], геодезию исключительно геометрическими задачами, неоправданно сужая ее сферу применения [Тетерин, 2006; 2010]. В 90-е годы в европейском научном сообществе были попытки признать геодезию разделом геофизики. Проходили горячие дискуссии, в которых, как и в случае с Г.Н. Тетериным, участвовала наша известнейшая геодезистка Мария Ивановна Юркина. В итоге, геодезия так и осталась самостоятельной и самодостаточной, несмотря на то, что она постоянно расширяет свою область применения за счет развития именно измерительных геодезических средств, а не, как в рассматриваемой диссертации, за счет привлечения моделей управленческих решений, что совершенно ей не свойственно и имеет отношение к иным, даже не смежным с ней, дисциплинам.

Согласно взглядам некоторых европейских геодезистов, геодезии свойственен определенный дуализм [Bašić, 2018]. Такое представление связано с диалектическим единством таких противоположностей, как наука и технология, базис и надстройка, общее и частное. В случае геодезии, это проявляется в ее фундаментальном и прикладном назначении, а также в ее научном и технологическом представлениях. В

¹ <https://rosreestr.gov.ru/activity/geodeziya-i-kartografiya/geodezicheskoe-obespechenie-territorii-rossiyskoy-federatsii/>.

научных кругах бытует крылатое выражение: «фундаментальная наука – роскошь богатых стран». Это ярко проявилось в России в последние десятилетия, когда государство преодолевало политический и экономический кризис. Фундаментальные задачи геодезии в этот период практически не интересовали государство, прикладные задачи решались на коммерческой основе. При этом интерес бизнеса к фундаментальным геодезическим задачам полностью отсутствует, в отличие от иного положения, существующего в развитых зарубежных государствах. Это также отразилось на профессиональной подготовке российских геодезистов. Отсюда возникли стремления пересмотра структуры и иерархии геодезии, как научной дисциплины, с которыми приходилось бороться ведущим российским ученым в области фундаментальной геодезии.

Ряд публикаций ведущих ученых геодезистов посвящен критике неоправданного пересмотра функций и структуры геодезии, в связи с игнорированием ее фундаментальных задач [Юркина, 2009; Бровар, Юркина, 2010а; 2010б; Юркина, Бровар, 2011]. Вот что пишут Б.В. Бровар и М.И. Юркина о геодезическом обеспечении, поставленном во главу угла автором диссертационной рукописи [Ознамец, 2021].

«Тактические задачи геодезии следуют из её главной научной задачи. Гравиметрия и космическая геодезия предоставляют данные о внешнем гравитационном поле во времени, астрономия – о высокоточной во времени ориентировке системы координат, геодезия (высшая и низшая) – о физической поверхности и элементах гравитационного поля Земли во времени, геодинамика – об изменениях во времени координат пунктов земной поверхности и характеристик гравитационного поля Земли, метрология – об эталонных, образцовых и рабочих средствах геодезических (в широком смысле) измерений, обеспечивая тем самым единство измерений. Все

указанные виды данных являются фундаментальной основой для создания высокоэффективной системы **геодезического обеспечения**, а также координатно-временного и навигационного обеспечения» [Юркина, Бровар, 2011]. В представленной трактовке есть ясное понимание того, что является фундаментальной основой, и как тактические задачи геодезии вытекают из ее основных задач.

Современная геодезическая наука никакого несовершенства не испытывает. Глобальное геодезическое обеспечение реализует Глобальная система геодезических наблюдений (Global Geodetic Observation System - GGOS) [https://ggos.org/]. Согласно мировому опыту, структура геодезии, как науки представлена тремя главными компонентами (столпами): геометрия, гравиметрия, астрометрия (Рис. 1).

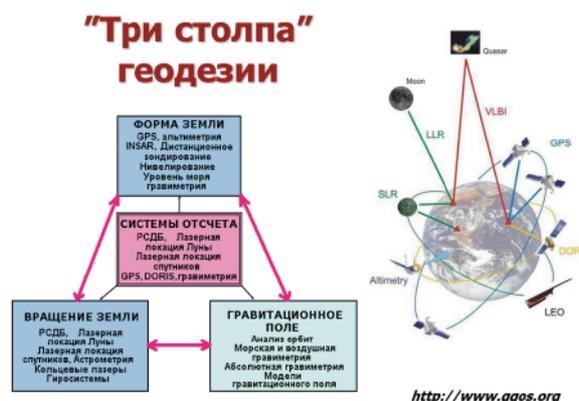


Рис. 1. Три главных компоненты современной геодезии и комплекс космических наблюдательных средств.

Все три ее компоненты создают глобальную геодезическую основу, являющуюся главным геодезическим обеспечением, даже не упомянутом в рассматриваемой диссертации [Ознамец, 2021]. Иерархия современного геодезического обеспечения, согласно мировым представлениям, показана на рис. 2.

Полное представление и информацию о современной реализации научных задач геодезии в их иерархической последовательности можно найти,

например, на сайте Международной ассоциации геодезии [<https://www.iag-aig.org/>], или в Национальном отчете Российской Федерации [Savinykh, Kaftan Eds., 2019].



Рис. 2. Комплексность и иерархия современного геодезического обеспечения.

Автор манускрипта [Ознамец, 2021] активно вводит новые понятия, предварительно «подготовив» их в собственных нерцензируемых публикациях. Например, таким новым понятием оказывается некая бизнес-геодезия. В этой связи следует процитировать мнение известных ученых геодезистов: «Право на введение нового термина необходимо доказывать, как изобретатель доказывает новизну, отличительные признаки и положительный эффект предлагаемого изобретения по отношению к принятому аналогу.» [Гравиметрия и геодезия, 2010].

Автор манускрипта [Ознамец, 2021] полностью игнорирует фундаментальные научные аспекты геодезии, а в своих многочисленных монографиях сводит ее к науке о некотором пространстве. При этом ее фундаментальные научные задачи он относит к второстепенным, что совершенно не соответствует мировым научным представлениям.

Странным обстоятельством является полное отсутствие в рассмотренном материале [Ознамец, 2011] геодезической теории, которая по Положению ВАК

должна являться содержанием докторской диссертации. В работе представлено незначительное количество вразумительных математических выражений, необходимых для описания геодезической теории.

Более того, представленные математические выражения отягощены разнообразными ошибками, не представляют решения задачи в явном виде и даже сам автор их попросту не понимает!

Из 9-ти конференций, на которых апробировалась работа [Ознамец, 2021], только одна имеет геодезическую тематику – Юбилейная конференция 240 лет МИИГАиК. Многочисленные публикации соискателя опубликованы в 21-издании, из которых только два журнала геодезические, в которых опубликовано лишь 15% от общего объема публикаций, и лишь 8% (менее одной десятой) в журналах, индексируемых в системе Scopus. Этого крайне недостаточно для докторской диссертации по геодезии, и это означает, что многочисленные декларации соискателя не получили широкого освещения и обсуждения среди геодезистов.

Работа изобилует ненаучными терминами и непоясняемой символикой.

Все это свидетельствует об очень условном отношении представленного соискателем изысканий [Ознамец, 2021] к области геодезии и ярко демонстрирует их «научный» уровень.

В связи с рассмотренной «работой», претендующей на докторскую степень в области геодезии, следует порекомендовать молодым исследователям серьезнее изучать достижения, полученные ранее ведущими российскими и зарубежными геодезистами. Соответствующие рекомендации по проведению исследований и разработок с учетом накопленного исторического опыта представлены в разделе монографии [Бровар, 2010].

Надлежащее отношение к геодезическому обеспечению в последние годы сформировалось в Организации

объединенных наций, которая организовала в своей структуре специальный геодезический подкомитет по устойчивой глобальной геодезической основе [<https://www.unggrf.org/>]. В этом отношении выработаны предложения по содействию развитию научно-исследовательских работ в области геодезии, картографии, землеустройства и смежных областях знаний в рамках Российского общества геодезии, картографии и землеустройства [Побединский, 2019]. Но, несмотря на участие в подкомитете представителей Минэкономразвития Российской Федерации, на эффективном развитии российского фундаментального геодезического обеспечения это, к сожалению, пока никак не отражается.

Заключение

Проанализированный материал [Ознамец, 2021] ярко демонстрирует плачевное состояние геодезической науки в нашем государстве.

Проблема усугубляется тем, что зачастую оппоненты и другие авторы отзывов диссертации не читают. Главными условиями принятия рукописи в диссертационный совет являются звонкие названия, в рассмотренном случае не имеющие никакого отношения к реальным проблемам.

Геодезию невозможно переписать под себя, как пытаются сделать некоторые соискатели ученых степеней и авторы самостоятельно изданных монографий. Она является самодостаточной и древней наукой. Она намного старше геофизики и занимает свое особое место в науках о Земле. Достаточно просто взглянуть на содержание функций комиссий и рабочих групп Международной ассоциации геодезии в составе Международного союза геодезии и геофизики, в названии которого геодезия, между прочим, занимает первое место. Геодезия эволюционирует за счет передовых измерительных средств, а не за счет словесной эквилибристики.

Существующее положение дел необходимо исправлять, в первую очередь, обратив внимание на повышение уровня геодезического образования на всех его стадиях и важность геодезии для развития цивилизованного государства. Для этого целесообразно вывести государственную геодезическую отрасль из подчинения фискальным и экономическим ведомствам.

Литература

1. Береговые процессы: мониторинг и инновационные комплексные исследования: Учебное пособие / В.С. Исаев, А.В. Кошурников, Е.И. Игнатов, Е.С. Каширина, А.А. Новиков, А.И. Гушин, О.И. Комаров, П.Ю. Пушкарев, М.Л. Владов, П.И. Котов, В.В. Вербовский, Р.М. Аманжуров, Е.И. Горшков; Под редакцией профессора Е.И. Игнатова, доцента В.С. Исаева. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2018 – 246 с.
2. Бровар Б.В., Юркина М.И. 2010. Изменения содержания задач геодезии и гравиметрии / В книге «Гравиметрия и геодезия». М.: Научный мир. С. 40–45.
3. Бровар Б.В. 2010. Приложение. / В книге «Гравиметрия и геодезия». М.: Научный мир. С. 500–501
4. Бровар Б.В., Юркина М.И. 2010. Приложение. Вклад ученых в теорию и практику и эволюция содержания главных задач геодезии и гравиметрии / В книге «Гравиметрия и геодезия». М.: Научный мир. С. 502–542
5. Видеозапись защиты диссертации Ознамца В.В. https://www.mii-gaik.ru/science/councils/congregation/21_12_23_oznamec/oznamets_VV.mp4
6. Гравиметрия и геодезия. — М.: Научный мир, 2010. — 572 с.: ил. 352.
7. Матвеев С.И., Коугия В.А. Цифровые (координатные) модели пути и спутниковая навигация железнодорожного транспорта. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. — 304 с.
8. Ознамец В.В. Разработка теоретических и технологических основ комплексного геодезического обеспечения устойчивого развития. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 2021. Москва. МИИГАиК. 260 с. <https://www.mii-gaik.ru/upload/iblock/c8d/c8d09d049895196d472d23b5b8fb474c.pdf>
9. Ознамец В.В. Разработка теоретических и технологических основ комплексного геодезического обеспечения устойчивого

- развития. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. 2021. Москва. МИИГАиК. 48 с. https://www.miigaik.ru/science/councils/congregation/21_12_23_oz-namec/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%20%D0%9E%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%86.pdf
10. Побединский Г.Г. Предложения по участию Российской Федерации в работах по созданию глобальной геодезической системы координат // Наука и технологии в промышленности. – 2019.- №3-4.- с. 127-144. https://www.researchgate.net/publication/357426283_Predlozenia_po_ucastiu_Rossijskoj_Federacii_v_rabotah_po_sozdaniu_globalnoj_geodeziceskoj_sistemy_koordinat
 11. Расчет элементов и разбивка железнодорожных кривых: учебное пособие / М.Я. Брынь, Н.В. Канахин, В.И. Полетаев; под ред. М.Я. Брыня. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2008. – 36 с.
 12. Тетерин Г.Н. Проблемы системной целостности и предметности в современной геодезии. // «Изыскательский вестник» 2010, № 1 (9), с. 41-49.
 13. Тетерин Г.Н. Теория развития и метасистемное понимание геодезии. Новосибирск: СГГА. 2006, 162 с.
 14. Физическая геодезия. Научно-технический сборник ЦНИИГАиК. – М.: Научный мир, 2013. – 288 с.
 15. Юркина М.И. 2009. О книге Г.Н. Тетерина «История геодезии (до XX в.)» // Геодезия и картография. № 5. С. 60–63.
 16. Юркина М.И., Бровар Б.В. 2011. Об эволюции содержания главных задач геодезии и гравиметрии // Изыскательский вестник. № 1 (11). С. 39–50.
 17. Bašić T. Dualizam u geodeziji - prednost ili mana? (Dualism in Geodesy - Advantage or Defeat?). / Conference: Radionica Geodetskog fakulteta za strukovne nastavnike škola koje obrazuju tehničare geodezije i geoinformatike At: Geodetska škola, Zagreb, 14.9.2014. September 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.18586.90568
 18. Klemas, V.V., 2015: Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. Journal of Coastal Research, 31(5), 1260 - 1267.
 19. Nechi S., Aouni B., Mrabet Z. Managing sustainable development through goal programming model and satisfaction functions. Ann Oper Res 293, 747–766 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03139-9>
 20. Savinykh V.P., V.I. Kaftan Eds. (2019), National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018, Geoinf. Res. Papers, Vol. 7, No. 1, BS7003, GCRAS Publ., Moscow, 100 pp., <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG>



GEODESY: PROBLEMS OF SCIENCE AND EDUCATION

Brovar B.V. ¹

Kaftan V.I. ²

Neyman Yu.M. ³

¹ Federal Scientific-Technical Center of Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure, Russia

² Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Russia

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

E-mail: bvbrovar@rambler.ru

E-mail: kaftan@geod.ru

E-mail: yuney@miigaik.ru

Abstract: Today, more than ever, the problem of the impoverishment of domestic geodesy in its scientific aspect is acute. In recent decades, this scientific direction has not been given sufficient attention by government authorities. The domestic branch of geodesy and cartography has lost its independent significance, which is unacceptable for the largest and highly developed state. These circumstances were reflected in the level of training of professional and, consequently, scientific personnel. The level of domestic geodetic science began to decline catastrophically. In the presented publication, an attempt was made to analyze the state of science and education of geodesy on the example of one of the doctoral dissertations. The need for greater attention of the state to this scientific field, as an essential element of the state infrastructure, is noted.

Key words: geodesy, science, education, dissertation defense.

© Коллектив авторов, 2022



GeoScience

S C I E N T I F I C J O U R N A L