

# Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 4

ГЕОЛОГИЯ

№ 2 • 2019 • МАРТ–АПРЕЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

Пушаровский Д.Ю., Степанов П.Ю., Николаева С.К., Крылов О.В. Образовательные стандарты геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: поиск ответов на вызовы времени . . . . .	3
Промыслова М.Ю., Брянцева Г.В., Демина Л.И., Косевич Н.И. Новейшие структуры Гераклейского полуострова (Юго-Западный Крым) . . . . .	8
Агибалов А.О. Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор сеймотектонических процессов . . . . .	17
Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Прудников И.А., Кошелева И.А., Володина Е.А., Мосейчук В.М. Тектоническая обстановка в районе Катав-Ивановских землетрясений в сентябре 2018 г. (Южный Урал) . . . . .	23
Степанов И.А., Казанский А.Ю., Киселев Д.Н., Косарева Л.Р., Рогов М.А., Тесакова Е.М., Щепетова Е.В., Шурупова Я.А. Возможности петромагнитных методов при палеоэкологических реконструкциях на примере юрских отложений (келловей–нижний оксфорд) разреза Михайловцемент (Рязанская область) . . . . .	30
Рослякова А.С., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А., Хамидуллин Р.А., Коробова Н.И., Макарова О.М., Козлова Е.В. Строение порового пространства коллекторских интервалов баженовской свиты Приобского месторождения Западной Сибири . . . . .	39
Топчий М.С., Пронина Н.В., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А., Фомина М.М., Карпов Ю.А., Козлова Е.В., Фадеева Н.П. Распределение органического вещества в породах баженовской высокоуглеродистой формации . . . . .	46
Карпов Ю.А., Балущкина Н.С., Ступакова А.В., Фомина М.М., Топчий М.С., Мифтахова А.А., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А. Критерии распространения нефтепродуктивных пород баженовской высокоуглеродистой формации с развитой системой поровой емкости в керогене . . . . .	57
Тюрин А.И., Исаев В.С., Сергеев Д.О., Тумской В.Е., Волков Н.Г., Соколов И.С., Комаров О.И., Кошурников А.В., Гунар А.Ю., Комаров И.А., Ананьев В.В. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований . . . . .	70
<i>Краткие сообщения</i>	
Чепиго Л.С., Ткаченко Н.С., Лыгин И.В. Определение параметров точечного источника по гравитационному полю, заданному на сфере . . . . .	82
Шайхуллина А., Дубинин Е.П., Булычев А.А., Гилод Д.А. Сравнительный анализ строения тектоносферы поднятий Конрад и Афанасия Никитина по геофизическим данным (Индийский океан) . . . . .	88
Лю И, Перчук А.Л., Зиновьева Н.Г. Свидетельство кумулюсной кристаллизации и локальные проявления эклогитового метаморфизма в оливиновом габбро комплекса Марун-Кеу (Полярный Урал) . . . . .	94

## CONTENTS

Pushcharovsky D.Y., Stepanov P.Y., Nikolaeva S.K., Krylov O.V. Educational standards of the geological faculty of Moscow State University: The search for answers to the challenges of our time . . . . .	3
Promyslova M.Yu., Bryantseva G.V., Demina L.I., Kosevich N.I. The newest structures of the Heraclion peninsula (South-Western Crimea) . . . . .	8
Agibalov A.O. Faults in the quarterly deposits in Northern Ladoga region as indicator of seismotectonic processes related to neotectonic activation of Precambrian structural plan . . . . .	17
Tevelev A.I.V., Tevelev Arc.V., Khotylev A.O., Prudnikov I.A., Kosheleva I.A., Volodina E.A., Moseichuk V.M. Tectonic situation in the area of Catav-Ivanovsk earthquakes in September 2018 (South Urals) . . . . .	23
Stepanov I.A., Kazansky A.Yu., Kiselev D.N., Kosareva L.R., Rogov M.A., Tesakova E.M., Shchepetova E.V., Shurupova Ya.A. Potencial of rock-magnetic methods in paleoecological reconstructions: case study of Mikhailovtsement reference section (Ryazan region) . . . . .	30
Roslyakova A.S., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A., Khamidullin R.A., Korobova N.I., Makarova O.M., Kozlova E.V. The structure of the pore volume of the reservoir intervals of the Bazhenov formation of the Priobskoye field of Western Siberia . . . . .	39
Topchii M.S., Pronina N.V., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A., Fomina M.M., Karpov Y.A., Kozlova E.V., Fadeeva N.P. Distribution of organic matter in Bazhenov high-carbon formation . . . . .	46
Karpov Yu.A., Balushkina N.S., Stoupakova A.V., Fomina M.M., Topchii M.S., Miftakhova A.A., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A. Criteria of distribution of Bazhenov's high-carbon formation oil-productive rocks with advanced kerogen porosity . . . . .	57
Tyurin A.I., Isaev V.S., Sergeev D.O., Tumskoi V.E., Volkov N.G., Sokolov I.S., Komarov O.I., Koshurnikov A.V., Gunar A.Yu., Komarov I.A., Ananiev V.V. Improvement of field methods of engineering-geocryological research . . . . .	70
<i>Brief communications</i>	
Chepigo L.S., Tkachendo N.C., Lygin I.V. Estimation of point source's parameters from the gravity field, measured on a sphere . . . . .	82
Shaikhullina A.A., Dubinin E.P., Bulychev A.A., Gilod D.A. Comparative analysis of the structure of the tectonosphere of the Conrad and Afanasy Nikitin Rises by geophysical data (the Indian Ocean) . . . . .	88
Liu Y.Y., Perchuk A.L., Zinovieva N.G. Evidence of cumulate crystallization and local development of the eclogite-facies metamorphism in the olivine gabbro of the Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia . . . . .	94

УДК 378:550

Д.Ю. Пуцаровский<sup>1</sup>, П.Ю. Степанов<sup>2</sup>, С.К. Николаева<sup>3</sup>, О.В. Крылов<sup>4</sup>

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ: ПОИСК ОТВЕТОВ НА ВЫЗОВЫ ВРЕМЕНИ

Изложена история становления многоуровневого геологического образования в МГУ. Рассмотрены особенности самостоятельно устанавливаемых образовательных стандартов и учебных планов на геологическом факультете МГУ. Анализируются трудности, возникшие при формировании структуры образовательных стандартов, составлении учебных планов и переходе на систему зачетных единиц. Поднимаются вопросы формирования структуры учебного процесса в магистратуре на основе магистерских программ, а не по профилям подготовки, как в бакалавриате.

*Ключевые слова:* высшее профессиональное образование, образовательные стандарты, учебные планы, зачетные единицы, магистерская программа, профиль подготовки, бакалавриат, магистратура, итоговая государственная аттестация.

Outlines the history of the formation of layered geological formations at MSU. The features of independently established educational standards and curricula at the geological faculty of Moscow state University are considered. The difficulties encountered in the formation of the structure of educational standards, curriculum development and transition to the system of credits are analyzed. Questions of formation of structure of educational process in a magistracy on the basis of master's programs, instead of on profiles of preparation, as in a bachelor's degree are brought up.

*Key words:* higher professional education, educational standards, curricula, credits, master's program, profile of training, bachelor's, master's, final state certification.

**Введение.** Система двухуровневого высшего геологического образования, реализуемая в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова в 1993–2011 гг., была чрезвычайно удачной и логически завершенной. Однако в 2010 г. МГУ вступил в новую образовательную эпоху, связанную с ведением образовательной деятельности не по федеральным образовательным стандартам, а по собственным, разработанным в МГУ образовательным стандартам, реализующим абсолютно новую образовательную траекторию — интегрированную шестилетнюю подготовку магистров. Поэтому именно с 2010 г. в МГУ началась непрерывающаяся по сей день работа по созданию и модернизации образовательных стандартов и учебных планов по всем направлениям подготовки, реализуемым в МГУ.

Геологический факультет также оказался участником этого процесса, что неизбежно повлекло за собой разрушение привычного и отлаженного механизма организации учебы. С одной стороны, необходимо было создать общую структуру для существующих на факультете шести профилей подготовки (вместо отмененных геоло-

гических специальностей) с тем, чтобы сохранить принципиально важную для подготовки геологов структуру высшего университетского образования. С другой стороны, нужно было ввести в состав основной образовательной программы (ООП) предложенный для всех факультетов обязательный перечень общеобразовательных дисциплин с фиксированной общей трудоемкостью.

Представленные в статье материалы будут, на наш взгляд, представлять интерес для методистов, преподавателей и научных сотрудников геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и других вузов, имеющих отношение к учебно-методической работе.

**Становление системы многоуровневого геологического образования в МГУ.** С момента образования геологического факультета МГУ до начала 1990-х гг. Московский университет готовил специалистов-геологов высшей квалификации по пятилетней программе специалитета. Эта образовательная программа неоднократно видоизменялась, дополнялась, улучшалась и оптимизировалась до состояния, которое, как представлялось, в то время полностью соответствовало задачам, стоящим

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, декан, профессор; *e-mail:* dmitr@geol.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, доцент; *e-mail:* stepanov@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, доцент; *e-mail:* sk.niko@geol.msu.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент; *e-mail:* krylov@geol.msu.ru

перед отечественной геологией. Большинство преподавателей и научных сотрудников геологического факультета старше 45 лет получили в МГУ именно классическое пятилетнее образование.

В 1993 г. в связи с процессами демократизации в России, а также сопровождающими их общественными преобразованиями и очевидной сменой жизненных ориентиров у молодого поколения на геологическом факультете МГУ была введена система многоуровневого высшего геологического образования, направленная на подготовку дипломированных специалистов и магистров геологии. Поступившие на факультет студенты зачислялись в бакалавриат (4 года обучения), где получали базовое геологическое высшее образование в соответствии с выбранной специальностью (ныне — профилем). В рамках направления «Геология» велась подготовка бакалавров геологии и специалистов по 6 специальностям, а магистров геологии по 30 магистерским программам. Бакалавры геологии, имея право продолжить обучение, поступали в магистратуру или на 5-й курс на конкурсной основе (таблица).

Эта система, по сути, двухуровневого высшего геологического образования, реализуемая в Московском университете вплоть до 2011 г., была чрезвычайно удачной и логически завершенной. В этот же период в сентябре 2003 г. на берлинской встрече министров образования европейских стран Россия присоединилась к Болонскому процессу. Начало Болонского процесса относится к середине 1970-х гг., когда Советом министров Европейского союза была принята резолюция о первой программе сотрудничества в сфере образования. В 1999 г. была подписана Болонская декларация, в которой 29 стран выразили готовность взять на себя обязательство повысить конкурентоспособность европейского пространства высшего образования, подчеркивая необходимость сохранения независимости и самостоятельности всех высших учебных учреждений. На сегодняшний день декларацию подписали 48 стран-участниц Болонского процесса.

Не углубляясь в оценку этой системы высшего образования, следует отметить, что существовавшая в то время практика организации учебы на геологическом факультете и согласованная с ректоратом МГУ, соответствовала вызовам времени и полностью себя оправдала. Ее суть заключалась в следующем. Примерно 1/3 выпуска студентов-бакалавров, в максимальной степени ориентированных на научные исследования, поступали в магистратуру. После двухлетнего обучения и защиты магистерской работы эти молодые люди чаще всего становились аспирантами геологического факультета. Тем самым осуществлялся многоуровневый отбор будущих кандидатов наук, которые со временем должны были занять ключевые позиции в геологической отрасли страны. Большая же часть выпускников бакалавриата геологического факуль-

тета (примерно 2/3 от выпуска) поступали в специалитет (на 5-й курс). После годичного обучения и защиты дипломной работы они начинали карьеру в различных производственных геологических организациях и в дальнейшем успешно работали именно как геологи-производственники высшей квалификации.

Обучение на 5-м курсе геологического факультета велось по шести специальностям: «Геология», «Геофизика», «Геохимия», «Гидрогеология и инженерная геология», «Геология и геохимия горючих ископаемых», «Экологическая геология» (начиная с 1995 г.).

Фундаментальность подготовки специалистов-геологов обеспечивалась наличием в учебных планах следующих циклов дисциплин, предусмотренных Государственным образовательным стандартом: гуманитарные и социально-экономические дисциплины (цикл ГСЭ); математические и естественнонаучные дисциплины (цикл ЕН); общепрофессиональные дисциплины (цикл ОПД); дисциплины специализации (цикл ДС); учебные и производственные практики; факультативы (ФТД); итоговая государственная аттестация (ИГА).

Основная образовательная программа подготовки магистра имела следующую структуру: дисциплины направления специализированной подготовки магистров (цикл ДНМ); специальные дисциплины магистерской подготовки (цикл СД); научно-исследовательская работа (НИР); практики по магистерским программам и научно-педагогическая; итоговая государственная аттестация магистра (ИГА). После успешного завершения магистратуры выпускнику присуждалась квалификация (степень) магистра геологии. До 1996 г. обучение магистрантов продолжалось 1 год и 3 месяца; начиная с 1997 г. магистратура стала двухлетней.

Решением коллегий Минобразования и МПР России 19 мая 1999 г. была принята к исполнению «Концепция геологического образования России», в основу которой положен «принцип триединства: геологическая наука — обучение — геологическая практика». Профессиональная подготовка геологов базировалась на унифицированных учебных планах, строгой системе контроля приема и выпуска дипломированных специалистов, высокоэффективной системе учебных и производственных практик. Важным моментом было распределение выпускников вузов на рабочие места. Тесная связь высшей школы с производством, отраслевой и академической наукой позволяла оперативно корректировать учебные планы и программы с учетом новых запросов народного хозяйства [Концепция..., 2000]. Так, например, была поставлена задача подготовки специалистов по экологической геологии. И в МГУ был впервые осуществлен выпуск специалистов с квалификацией «геолог-эколог».

**Структура высшего профессионального образования в МГУ по направлению 511000 «Геология» в 2010 г.**

Кафедра	Профилизации (четырёхлетний бакалавриат) и специализации (5-й курс)	Магистерские программы (двухлетнее образование после бакалавриата)
011100 геология		
1. Динамической геологии	Геологическая съёмка и поиски	Геотектоника
2. Региональной геологии и истории Земли		Региональная геология Стратиграфия
3. Геологии и геохимии полезных ископаемых	Геология и разведка месторождений полезных ископаемых	Экономическая геология
4. Геологии России	Компьютерные технологии в геологических исследованиях	
5. Палеонтологии	Палеонтология	Палеонтология
6. Литологии и морской геологии	Литология Морская геология	Литология Геология дна морей и океанов
011200 геофизика		
7. Геофизических методов исследования земной коры	Электрометрия Гравиметрия и магнитометрия Инженерная геофизика Экологическая геофизика	Геофизические методы исследования земной коры Экологическая геофизика
8. Сейсмологии и геоакустики	Сейсмометрия и сейсмология Морская геофизика Геолого-геофизические исследования месторождений нефти и газа	Геофизика Геолого-геофизические исследования месторождений нефти и газа
011300 геохимия		
9. Геохимии	Геохимия Геохимические методы поисков	Геохимия
10. Минералогии	Минералогия	Минералогия
11. Петрологии	Петрология	Петрология
12. Кристаллографии и кристаллохимии	Геммология Кристаллография и кристаллохимия	Геммология Кристаллография и кристаллохимия
011400 гидрогеология и инженерная геология		
13. Гидрогеологии	Гидрогеология Гидрогеоэкология Гидрогеология месторождений нефти и газа	Гидрогеология Гидрогеоэкология Гидрогеология нефтегазоносных бассейнов
14. Инженерной и экологической геологии	Инженерная геология Грунтоведение и искусственный литогенез Охрана геологической среды	Инженерная геология Грунтоведение и искусственный литогенез
15. Геокриологии	Общая геокриология Инженерная геокриология	Геокриология
011500 геология и геохимия горючих ископаемых		
16. Геологии и геохимии горючих ископаемых	Геология нефти и газа Геология месторождений угля и сланцев Геология морских нефтяных и газовых месторождений Экологическая нефтегазовая геология	Геология и геохимия нефти и газа Геология угля и сланцев Геология морских нефтяных и газовых месторождений Экологическая нефтегазовая геология Геолого-геофизические исследования месторождений нефти и газа
013300 экологическая геология		
Геохимии, инженерной и экологической геологии, гидрогеологии, геокриологии	Экологическая геология Экологическая гидрогеология Экологическая геохимия Экологическая геокриология	Экологическая геология Экологическая геохимия Экологическая геокриология

Действующие в 1990–2000-е гг. учебные планы подготовки бакалавров, специалистов и магистров были разработаны и утверждены на основе Государственных стандартов высшего профессионального образования. В создании их проектов самое активное участие принимали сотрудники геологического факультета В.Т. Трофимов, Б.А. Соколов, В.А. Богословский, М.Г. Попов и др. Некоторые допустимые расхождения со стандартами были направлены на повышение роли специальных дисциплин (увеличение общего объема часов), а также практик. Учебные планы геологического факультета пересматривались не чаще, чем раз в 5 лет. В них вводились некоторые текущие изменения, не носившие принципиальный характер, которые по предложению учебно-методического совета утверждались Ученым советом факультета.

В 2000–2004 гг. были составлены и изданы учебно-методические сборники, содержащие учебные планы, программы дисциплин, учебных и производственных практик, требования к государственному экзамену (он проводился в конце бакалавриата) и выпускной квалификационной работе, которые почти десятилетие не теряли своей актуальности [Выпускные..., 2002; Специализации..., 2004; Учебные..., 2004; Учебные и производственные..., 2004].

Завершая этот раздел, добавим, что 27 октября 2007 г. в России вступил в силу Закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (в части уровней высшего профессионального образования)», другими словами, закон о двухуровневой системе высшего образования: бакалавриат — первый уровень, магистратура либо специалитет (подготовка специалистов) — второй уровень. Эти уровни подразумевают отдельные государственные образовательные стандарты и самостоятельную итоговую аттестацию. При этом в ряде вузов число мест в магистратуре или специалитете оказалось значительно меньше числа выпускников бакалавриата. Геологический факультет МГУ был вполне готов к реализации Закона, поскольку фактически уже более 10 лет осуществлял многоуровневую подготовку бакалавр — специалист — магистр. В 2010 г. на геологическом факультете был завершен выпуск специалистов; план приема на 1-й курс бакалавриата составил 200 человек, в магистратуру — 160 человек.

**Образовательные стандарты МГУ и учебные планы нового поколения.** В 2010 г. Московский университет вступил в новую образовательную эпоху, связанную с ведением образовательной деятельности не по федеральным, а по собственным образовательным стандартам, разработанным в МГУ и только для студентов МГУ. Перед факультетами в то время стоял выбор: переходить на новые, самостоятельно устанавливаемые МГУ образовательные стандарты или оставаться в рамках действующих федеральных стандартов. Именно с

2010 г. в Московском университете началась непрекращающаяся по сей день работа по созданию, видоизменению, улучшению и модернизации образовательных стандартов и учебных планов по всем направлениям подготовки, реализуемым в МГУ. Геологический факультет также оказался участником этого процесса, что неизбежно повлекло за собой разрушение привычного и отлаженного механизма организации обучения.

На факультете началась работа по составлению образовательных стандартов МГУ нового поколения по направлению «Геология». Первоначально ставилась задача создать стандарты, реализующие 6-летнюю подготовку специалистов-геологов. Методический совет факультета подготовил семь образовательных стандартов, шесть из них определяли основные образовательные программы подготовки специалистов высшего профессионального образования по шести классическим геологическим специальностям (таблица), которые наиболее полно учитывали потребности геологической отрасли, сложившиеся традиции и специфику процесса подготовки геологов в Московском университете. Еще один (седьмой) стандарт был составлен для двухлетней подготовки магистров по направлению «Геология» и ориентирован на обучение в магистратуре геологического факультета МГУ выпускников бакалавриата из других вузов, а также на обучение магистрантов Высшей школы инновационного бизнеса МГУ. В дальнейшем именно этот последний стандарт был принят к реализации на геологическом факультете в период с 2011 по 2015 г. [Степанов, Николаева, 2013].

Весной 2011 г. ректором МГУ была поставлена новая задача: создать образовательный стандарт (ОС), самостоятельно устанавливаемый МГУ имени М.В. Ломоносова, позволяющий реализовывать абсолютно новую образовательную траекторию — интегрированную шестилетнюю подготовку магистров по направлению «Геология». Эта задача оказалась достаточно сложной. С одной стороны, необходимо было создать общую структуру для существующих на факультете шести профилей подготовки (вместо отмененных геологических специальностей) с тем, чтобы сохранить принципиально важную для подготовки геологов структуру высшего университетского образования. С другой стороны, нужно было ввести в состав ООП предложенный для всех факультетов обязательный перечень общеобразовательных дисциплин с фиксированной общей трудоемкостью (57 зачетных единиц — почти полный учебный год). На основе единых для МГУ двух типов макетов были составлены два образовательных стандарта для программ ВПО, связанных с подготовкой магистров по направлению «Геология». Первый — для лиц, не имеющих диплома о базовом геологическом образовании с присвоением квалификации магистр и двухлетним сроком освоения программы обучения; второй — с присвоением квалификации

бакалавр и магистр, со сроками обучения 4 и 2 года соответственно. Тексты подготовленных геологических стандартов прошли экспертизу у методистов нескольких естественнонаучных факультетов Московского университета и были утверждены Приказом по МГУ имени М.В. Ломоносова № 729 от 22 июля 2011 г.

Одновременно шла работа по составлению новых учебных планов, которую выполнял коллектив методического совета геологического факультета. Дополнительную сложность представляли жесткие рамки системы зачетных единиц (1 з.е. соответствует 36 академическим часам общей трудоемкости дисциплины; на 1 неделю практики приходится 1,5 з.е.; в учебном году 60 з.е. и др.).

В 2011 г. факультет должен был провести прием студентов в бакалавриат и магистратуру уже по новым образовательным стандартам и учебным планам. Поэтому к концу июня 2011 г. было составлено семь учебных планов: учебный план для двухлетней магистратуры («ММ»-план для наборов 2011–2014 гг. уже обучающихся на факультете студентов) и шесть бакалаврских («ИБ») планов для 6 профилей подготовки соответственно.

В последующие годы происходила многократная коррекция учебных планов. Она включала разработку приложений к ним, а по сути — создание обновленных версий этих планов. Новые требования касались введения профильной магистратуры, межфакультетских учебных курсов, преддипломных практик, изменения трудоемкости и длительности государственной итоговой аттестации, распределения по семестрам зачетных единиц по физической культуре, норм лекционных часов в общем объеме аудиторной нагрузки и многое другое. В 2015 г. произошла коррекция ОС МГУ и учебных планов в связи с введением новой версии федерального образовательного стандарта (так называемого ФГОС 3+). А уже в 2017 г. была начата работа над составлением новых образовательных стандартов, самостоятельно устанавливаемых МГУ имени М.В. Ломоносова по направлению «Геоло-

гия», в которых должны быть учтены требования новейшей версии ФГОС, которая носит рабочее название «ФГОС 3++».

Представленный выше довольно сжатый и формальный перечень учебно-методических новаций свидетельствует о сложностях в организации учебного процесса на факультете, которые, тем не менее, преодолеваются. Очевидно, что после всех нововведений существенно увеличилась нагрузка на учебный отдел геологического факультета и на каждого преподавателя в отдельности, острее ощущаются проблемы с аудиторным фондом и его оснащением, резко возрос оборот документов. Наступило время жесткого регламентирования всей образовательной деятельности. К большому сожалению, это неизбежно отнимает время от более важных задач — непосредственной работы преподавателя со студентами, научных исследований, общения инспектора учебного отдела с подопечными, работы куратора в группе.

Все эти вопросы неизменно оказываются в фокусе внимания собраний учебно-методического совета по геологическому образованию, ежегодно проводимых на факультете с участием деканов и заведующих кафедрами 25 российских классических университетов. Общее мнение наших коллег вселяет уверенность в том, что, как и раньше, на протяжении восьми десятилетий, прошедших с момента образования геологического факультета в МГУ, мы готовим выпускников, способных успешно работать в геологии. Университетские геологи убеждены, что упорный труд, компетентность и здравый смысл помогут найти правильный ответ на вызовы, стоящие перед современной наукой и образованием, и будут способствовать их дальнейшему развитию.

На весенней сессии РАН 2018 г. в одном из выступлений прозвучало, что геологи спасли страну во время Великой Отечественной войны, а теперь спасают экономику России. Возможно, кто-то с этим не согласится, но в нашей стране роль геологии трудно переоценить, и наш долг — служить ей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Выпускные работы и государственный экзамен / Под ред. Б.А. Соколова, М.Г. Попова, И.А. Михайловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 285 с.

Концепция геологического образования в России: Материалы совместного заседания коллегий Минобрнауки России и МПР России. М.: НИИ-Природа, 2000. 135 с.

Специализации и магистерские программы геологического факультета МГУ. Т. I / Под ред. Д.Ю. Пушаровского, М.Г. Попова, И.А. Михайловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004а. 314 с.

Специализации и магистерские программы геологического факультета МГУ. Т. II / Под ред. Д.Ю. Пушаровского, М.Г. Попова, И.А. Михайловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004б. 182 с.

Степанов П.Ю., Николаева С.К. Образовательные стандарты и учебные планы нового поколения геологического факультета МГУ: опыт и проблемы // Новые

образовательные стандарты высшего профессионального образования: проблемы создания и внедрения. М.: Агентство «Мегаполис», 2013. С. 112–122.

Учебные планы и программы геологического факультета МГУ. Т. I / Под ред. Д.Ю. Пушаровского, М.Г. Попова, И.А. Михайловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004а. 434 с.

Учебные планы и программы геологического факультета МГУ. Т. II / Под ред. Д.Ю. Пушаровского, М.Г. Попова, И.А. Михайловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004б. 412 с.

Учебные и производственные практики геологического факультета МГУ / Под ред. Б.А. Соколова, И.А. Михайловой, В.А. Егорова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 300 с.

Поступила в редакцию  
Поступила с доработки  
Принята к публикации

УДК 551.21 (234.86)

М.Ю. Промыслова<sup>1</sup>, Г.В. Брянцева<sup>2</sup>, Л.И. Демина<sup>3</sup>, Н.И. Косевич<sup>4</sup>

## НОВЕЙШИЕ СТРУКТУРЫ ГЕРАКЛЕЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ)

Приведены результаты структурно-геоморфологического анализа Гераклейского полуострова Юго-Западного Крыма. Выделены Западный, Центральный и Юго-Восточный сегменты, отличающиеся густотой и направлением зон трещиноватости, разрывов, характером овражно-балочной сети, строением береговой зоны. Показано, что в верхнем структурном этаже неотектонические движения наиболее интенсивно проявлены над позднеюрско-раннемеловой коллизионной сутурой, образовавшейся при закрытии задугового бассейна с корой океанического типа.

*Ключевые слова:* неотектоника, структурно-геоморфологический анализ, разрывы, зоны трещиноватости, Гераклейский полуостров, Юго-западный Крым.

The article presents the results of the structural-geomorphological analysis of the Heraklion peninsula of the South-Western Crimea. The Western, Central and South-Eastern segments are distinguished, differing in density and direction of fracture zones, faults, the nature of the ravine-gulch net, and the structure of the coastal zone. It is shown that neotectonic movements in the upper structural floor are most intensively manifested over the Late Jurassic-Early Cretaceous collisional suture formed when the back-arc basin with the oceanic crust was closed.

*Key words:* neotectonics, structural-geomorphological analysis, fault, fracture zones, Heraklion peninsula, South-Western Crimea.

**Введение.** В Горном Крыму неотектонический этап начался по разным данным в олигоцене [Юдин, 2011; Nikishin et al., 2017], плиоцене [Вольфман, 2014] и выражается в поднятии горного сооружения, которое только за четвертичное время оценивается в 700 м [Верховцев, 2007]. Кайнозойские структуры Крыма образовались и продолжают формироваться в настоящее время за счет подвига субокеанической коры Черного моря под Крымский п-ов [Юдин, 2011]. В пределах Гераклейского п-ва, расположенного на крайнем юго-западе Крыма, неотектонические движения также проявлены довольно отчетливо.

Своеобразие геоморфологического строения полуострова обусловлено сложностью геологической структуры района и особенностью современных тектонических движений, что отмечали многие исследователи [Борисенко и др., 1982; Иванов и др., 2009; Ломакин и др., 2009, 2014; Юдин, 2011; Муровская и др., 2018]. На фоне общего поднятия в Юго-Западном Крыму отмечен ряд участков, испытывающих локальное опускание, что особенно отчетливо наблюдается в некоторых прибрежных районах [Брянцева, Романовская, 2017]. Юго-восточная часть полуострова, ограниченная 100–200-метровыми отвесными обрывами,

активно поднимается. Здесь сходятся Внешняя и Внутренняя гряды Крымских гор. Северо-западное побережье, напротив, опускается и изрезано затопленными морской водой балками. Строение береговой зоны, детально изученной А.Ю. Саниным [2014], свидетельствует о ее формировании за счет активных современных тектонических процессов, опережающих абразионные.

Гераклейский п-ов имеет сложное геологическое строение. Верхний структурный этаж сложен известняками и глинами неогена, залегающими субгоризонтально и образующими плато. Они подстилаются выклинивающейся на юго-запад маломощной меловой и палеогеновой толщей. Образования среднего структурного этажа обнажены в береговых обрывах района мыса Фиолент и представляют собой меланж, состоящий из кластолитов и матрикса юрских магматитов. Нижний структурный этаж, выделяемый по геофизическим данным, представлен слоистой осадочной, предположительно сложенной битакскими конгломератами, толщей, смятой в крупную Гераклейскую антиклиналь. Структуры полуострова относятся к неокиммеридам, сформировавшимся в неоген-четвертичное время [Юдин, 2011].

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ст. препод., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* maгу\_promyslova@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, университет «Дубна», кафедра экологии и наук о Земле, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* bryan.bryan@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* lidem06@rambler.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ассистент, канд. геогр. н.; *e-mail:* nkosevich@gmail.com

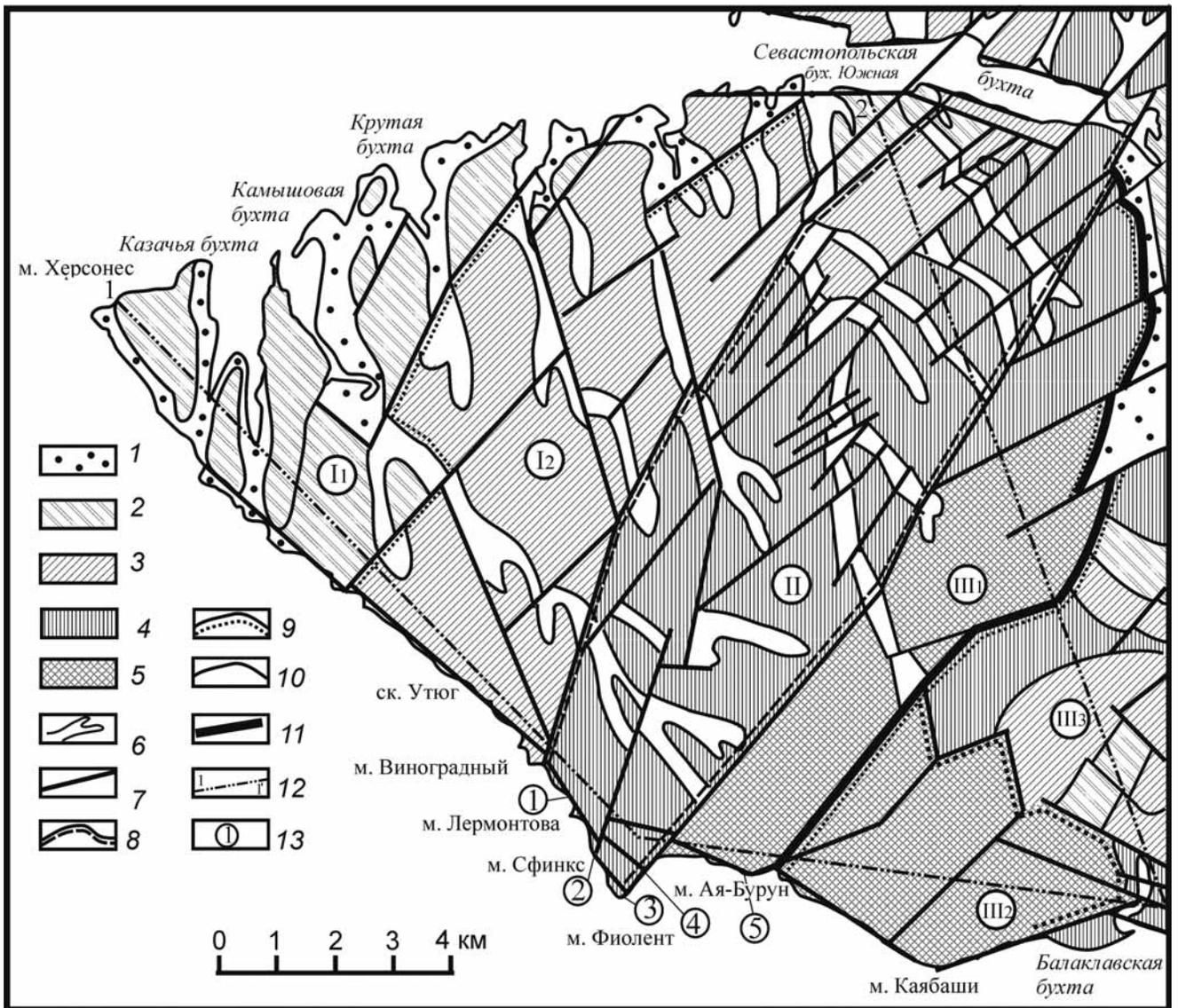


Рис. 1. Структурно-геоморфологическая схема Гераклейского полуострова. Суммарные конэрозионные поднятия (м): 1 – <10, 2 – 10–20, 3 – 50–100, 4 – 100–200, 5 – >200; 6 – овражно-балочная сеть; 7 – разрывы; 8 – границы структур 1-го порядка; 9 – границы структур 2-го порядка; 10 – границы отдельных структур; 11 – зона Георгиевского разлома; 12 – линии профилей; 13 – номера точек фото обнажений береговых обрывов; I – Западный сегмент (I<sub>1</sub> – Прибрежная равнина, I<sub>2</sub> – Николаевское поднятие); II – Центральный сегмент; III – Юго-Восточный сегмент (III<sub>1</sub> – Георгиевское поднятие, III<sub>2</sub> – Каябашское поднятие, III<sub>3</sub> – Балаклавская впадина)

Гераклейский п-ов расположен в районе повышенной сейсмической опасности. Согласно Б.Г. Пустовитенко с соавторами [2006], большая его часть находится в зоне девятибалльной интенсивности сотрясений на средних грунтах, а южная — в десятибалльной зоне по шкале MSK-64. Здесь расположены города Севастополь и Балаклава, где ведется интенсивное строительство. В связи с этим выявление активных неотектонических структур представляет весьма актуальную задачу для этого региона.

**Методы исследования.** Для изучения новейшей тектоники западного побережья Крыма выполнены структурно-геоморфологические исследования с выделением пликативных и разрывных новейших структур, методика которых была разработана Н.П. Костенко [Корчуганова, Костенко др., 2001].

Они позволяют анализировать деформации земной коры, образовавшиеся в неотектонический этап развития и различно проявленные в рельефе. Изучение таких орографически выраженных развивающихся деформаций проводится в плане путем специализированного дешифрирования топографических карт и в вертикальных сечениях, реализованных путем построения геолого-геоморфологических профилей. Определение динамической активности разрыва проводится по комплексу орографических признаков: деформациям зоны плоскостной денудации; перекосам долин, разделяющих блоки; разновысотности блоков, сложенных породами примерно одинаковой противоденудационной устойчивости, или по их разному наклону, резкому изменению крутизны склонов.

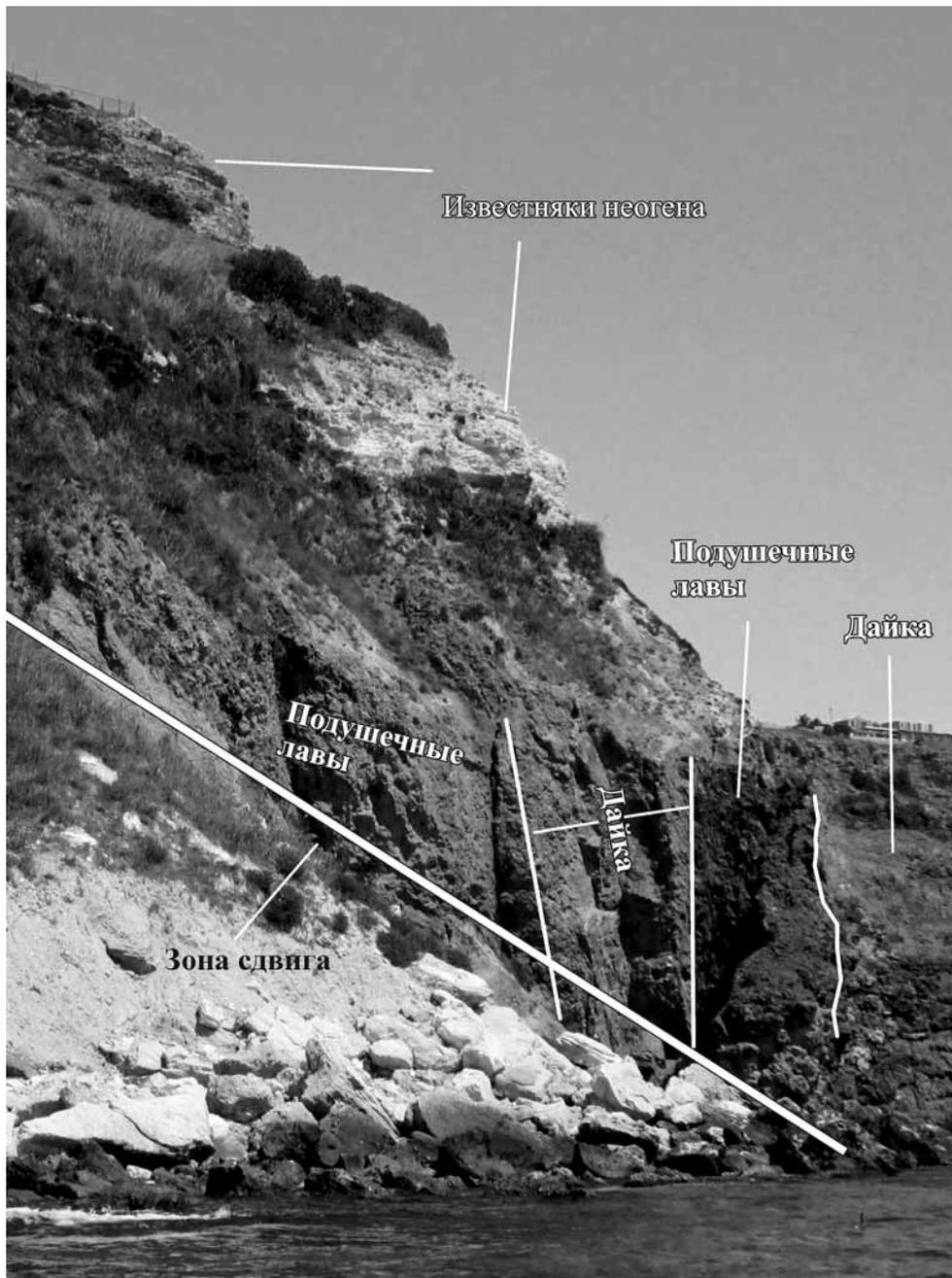


Рис. 2. Активизированная зона сдвига северо-западного простираения в районе мыса Броневой (точка 1 на рис. 1)

Уникальность Гераклейского п-ва состоит в том, что связь новейших структур с активизированными древними разрывами можно наблюдать при полевых исследованиях непосредственно в обнажениях береговых обрывов.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате дешифрирования топографической карты была построена структурно-геоморфологическая схема Гераклейского п-ва (рис. 1). Береговая линия на некоторых участках совпадает с зонами разрывов. Крупный субширотный разрыв расположен на северной границе Гераклейского п-ова и разрабатывается долиной р. Черная, образующей в нижнем течении Севастопольскую бухту. Согласно С.Л. Бызовой [1980], этот разрыв коррелирует с Симферопольским, который имеет субширотное простираение и проходит по

долине р. Черная, а затем меняет простираение на северо-восточное. На юге полуострова картируется разрыв, который хорошо выражен в ориентировке побережья между мысами Херсонес и Фиолент. Разрыв, вероятно, наследует древнюю сдвиговую трансформную зону спредингового задугового бассейна с океанической корой [Промыслова и др., 2017]. Эта зона хорошо видна в клифе района мыса Броневой, где в подушечных лавах и дайках встречаются многочисленные зеркала скольжения, по которым интенсивно развивается ожелезнение (рис. 2).

В пределах Гераклейского п-ова в новейшей структуре можно выделить несколько сегментов (рис. 1): Западный (I), Центральный (II) и Юго-Восточный (III) (здесь и далее названия новейшим структурам даны условные), границами которых

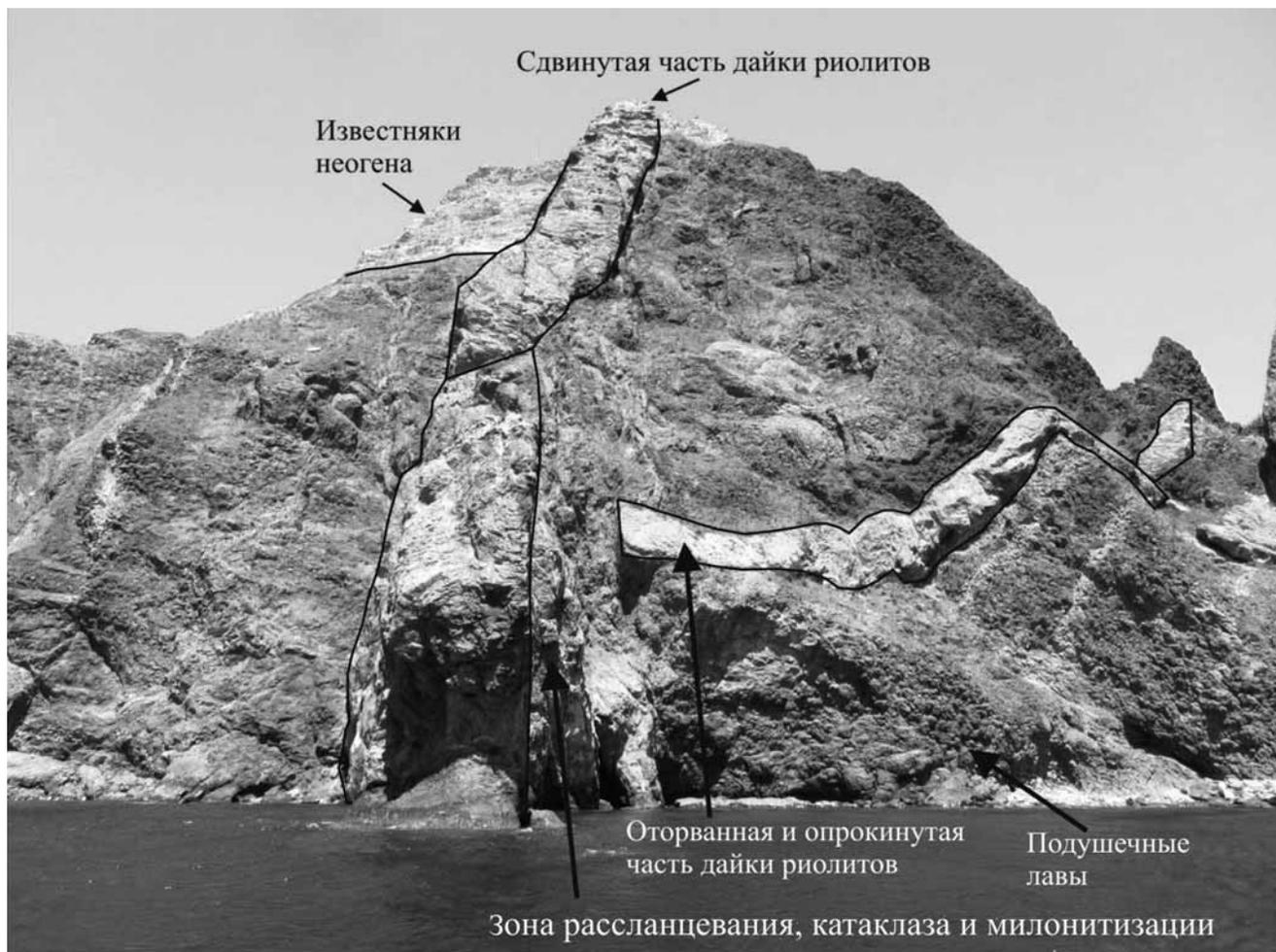


Рис. 3. Зона разрыва в подушечных лавах, мыс Фиолент (точка 3 на рис. 1)

служат разрывные нарушения, а также зоны трещиноватости, проявляющиеся в рельефе над активизированными в настоящее время разрывными нарушениями нижних структурных этажей.

**Западный сегмент (I)**, расположенный на крайнем юго-западе Крымского п-ова, имеет сложное геологическое строение. В его пределах можно выделить структуры 2-го порядка: Прибрежную равнину ( $I_1$ ) и Николаевское поднятие ( $I_2$ ).

**Прибрежная равнина ( $I_1$ )** простирается вдоль юго-западного и северо-западного побережья полуострова и отделена от Николаевского поднятия зоной тектонических нарушений северо-восточного простирания. Здесь развит преимущественно аккумулятивный рельеф с высотой не более 50 м и небольшим клифом, высотой всего несколько метров. Отчетливо видны признаки опускания побережья. Северный берег Гераклеийского п-ова расчленен многочисленными глубокооврезанными сухими каменистыми балками, переходящими в протяженные морские заливы — бухты Соленая, Казачья, Камышовая, Стрелецкая, Карантинная, Круглая и др. Морские воды далеко ингрессировали в глубь полуострова. По мнению И.Э. Ломакина с соавторами [2009], структуры, определяющие

конфигурацию и простирание севастопольских бухт и связанных с ними балок, были заложены, скорее всего, в среднем сармате.

**Николаевское поднятие ( $I_2$ )** расположено на востоке от Прибрежной равнины. В его пределах высота постепенно повышается, суммарные конэрозионные поднятия достигают 100 м. На поверхности это поднятие сложено сарматскими известняками миоцена, падающими на северо-запад под углом 2–3°. Известняки разбиты системами трещин северо-западного и север-северо-западного простирания, которые разрабатываются овражно-балочной сетью. Система трещин север-северо-восточного и северо-восточного простирания деформирует долины оврагов и балок, изменяя их простирание. Эти трещины могли возникнуть в кайнозойском сдвиговом поле напряжений с северо-восточной ориентировкой оси сжатия и северо-западной ориентировкой оси растяжения [Муровская и др., 2018]. Сочленения зон трещиноватости разного направления создают тектонические узлы [Ломакин и др., 2009].

**Центральный сегмент (II)** отделяется от Западного и Юго-Восточного протяженными разрывными нарушениями север-северо-восточного простирания, которые возникли, скорее

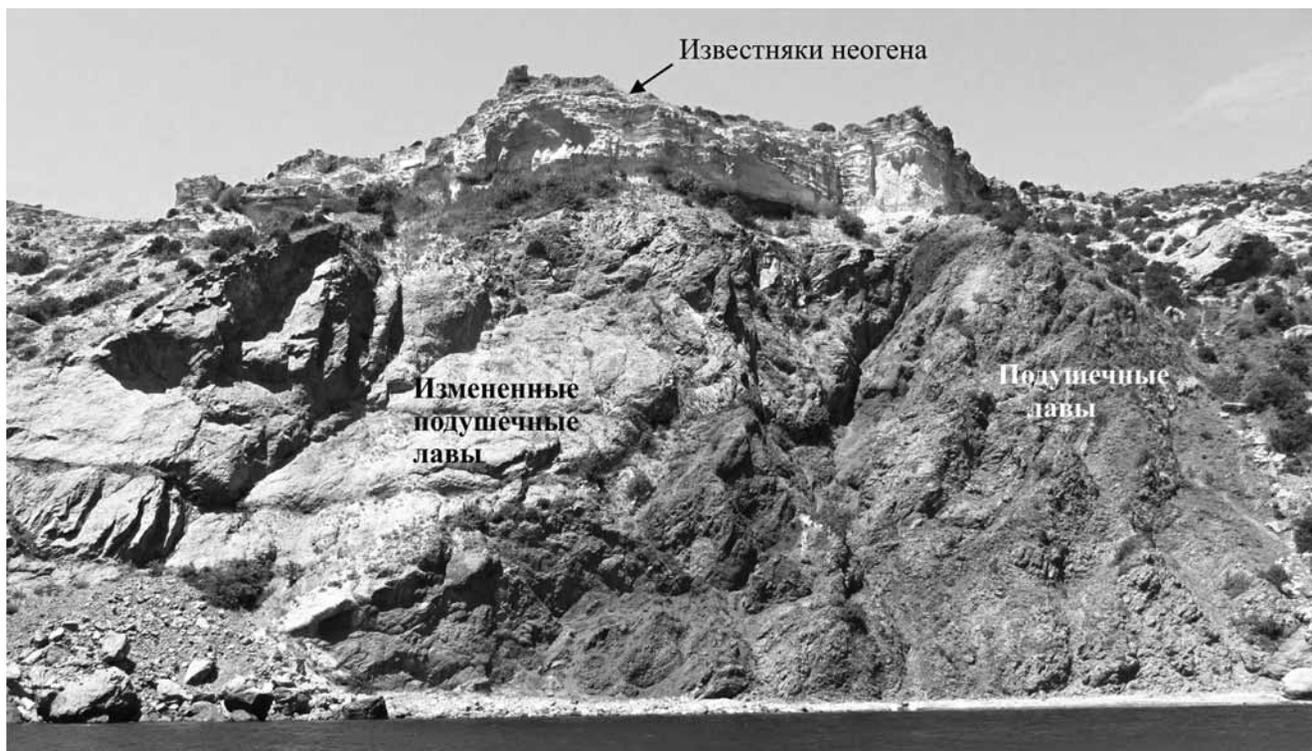


Рис. 4. Разрывы в пластинах подушечных лав с разной степенью измененности, клиф в западной части Яшмовой бухты (точка 4 на рис. 1)

всего, также в кайнозойском сдвиговом поле напряжений. Известняки миоцена, залегающие на высоте 200 м и более, разбиты системой трещин, разрабатываемой овражно-балочной сетью. В Центральном секторе широко развита зона тектонических нарушений восток-северо-восточного простирания. Многочисленные трещины значительно деформируют долины оврагов и балок, изменяя их простирание. Особенно густая сеть разрывов наблюдается на севере и северо-востоке от мыса Фиолент. Она фиксирует, вероятно, неотектонические движения в пределах Предгорной сутуры, расположенной под мел-кайнозойскими отложениями, которая трактуется В.В. Юдиным [2011] как коллизионный шов от поглощения океанической коры древнего океана Мезотетис. Отметим, что, по В.В. Юдину [2011], окончание коллизионной сутуры в пределах Гераклеяского п-ова находится на западе от скалы Утюг. Именно здесь в меланже были описаны коренные выходы ановерлитовых серпентинитов [Демина и др., 2015]. Магматиты, развитые в районе мыса Фиолент, согласно В.В. Юдину [2011], представлены глыбами в составе Симферопольского меланжа. М.Ю. Промысловой с соавторами [2016] показано, что эти глыбы представляют собой фрагменты офиолитовой ассоциации, сформированной в задуговом бассейне, достигшем в своем развитии спрединговой стадии.

Зоны трещиноватости субширотной ориентировки незначительно распространены в районе мыса Фиолент. Южная береговая зона с высотой клифа, достигающей 100 м и более, по-видимому,

в настоящее время испытывает значительное воздымание. Здесь формируются высокие обрывистые, практически вертикальные склоны, повсеместно наблюдаются грандиозные обвалы массы. Выделяется крупная зона трещиноватости северо-восточного простирания, берущая начало от мыса Фиолент. Она служит границей двух типов рельефа — расчлененного овражно-балочной сетью на запад, на востоке подобное расчленение практически отсутствует (рис. 1). Юго-западное окончание этой зоны находится непосредственно в районе мыса Фиолент, где породы офиолитовой ассоциации наиболее деформированы, что хорошо видно в клифах собственно мыса Фиолент (рис. 3) и прилегающей части Яшмовой бухты (рис. 4).

На восток от мыса Фиолент выделяется несколько параллельных зон разломов северо-восточного простирания, в которых подушечные лавы подверглись аналогичным изменениям. В основании мыса Лермонтова субвертикальное разрывное нарушение северо-западного простирания, по которому приподнят массив сильнотрещиноватых габбродолеритов, хорошо прослеживается и в вышележащих известняках неогена, что свидетельствует об активности этого разрыва в новейшее время. В вертикальных стенках 100-метровой высоты в районе мыса Сфинкс хорошо видны субвертикальные разрывы, разбивающие толщи подушечных лав и образующие так называемые цветковые структуры, возникающие в условиях сдвиговых деформаций [Sylvester, 1988]. Этот левый сдвиг север-северо-восточного простирания хорошо выражен в пределах карбонатного плато

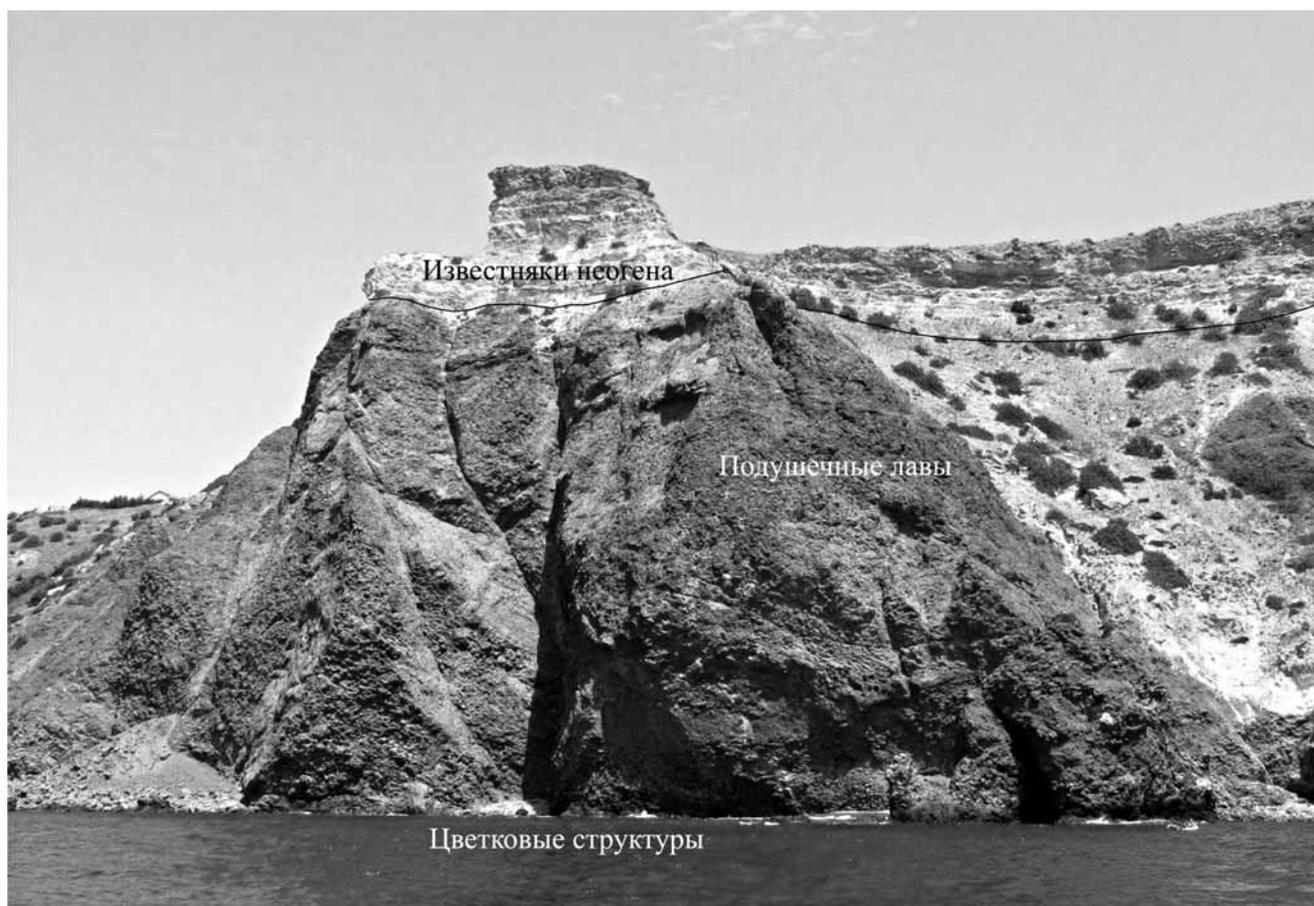


Рис. 5. Цветковые структуры в подушечных лавах мыса Сфинкс (точка 2 на рис. 1)

(рис. 1). Разрывы прослеживаются и в вышележащих интенсивно разрушающихся сарматских известняках, менее устойчивых по сравнению с вулканическими толщами (рис. 5). Отметим, что ранее Л.С. Борисенко с соавторами [1982] также выделяли этот разрыв как сброс.

**Юго-Восточный сегмент** (III) включает структуры меньших порядков: Георгиевское ( $III_1$ ) и Каябашское поднятия ( $III_2$ ), а также Балаклавскую впадину ( $III_3$ ).

**Георгиевское поднятие** ( $III_1$ ) с высотой более 250 м расположено на востоке от Центрального сектора и отделено от него крупным разрывом север-северо-восточного простирания. Поднятие практически не расчленено овражно-балочной сетью, а простирание трещин по сравнению с Центральным сектором меняется на северо-восточное. В.В. Иванов с соавторами [2009] считают, что эта часть Гераклейского плато расположена в зоне влияния Георгиевского разлома. Восточная граница поднятия неровная и совпадает с Георгиевским разломом, представляющим собой довольно широкую, хорошо выраженную в рельефе зону эшелонированных тектонических нарушений [Ломакин и др., 2009]. Эти нарушения, отличающиеся по кинематике и амплитуде, неоднократно оживлялись в периоды тектонической активизации территории [Иванов и др., 2009].

Известняки сарматского яруса неогена, залегающие полого на всей площади Гераклейского п-ова, в западном борту Мраморной балки и в районе мыса Айя-Бурун приобретают крутой угол падения на северо-запад, что свидетельствует об активных деформациях в новейшее время. Здесь также наблюдается большое количество вертикальных трещин в неогеновых известняках, а также в нижележащих подушечных лавах и брекчиях офиолитовой ассоциации [Промыслова и др., 2017]. В этом районе Гераклейского п-ова проявляются наиболее интенсивные обвальные процессы (рис. 6).

**Каябашское поднятие** ( $III_2$ ), расположенное между Мраморной балкой и Балаклавской бухтой, сложено верхнеюрскими известняками. Суммарное конэрозионное поднятие достигает высоты 200–250 м. Эта структура расчленена разрывами восток-северо-восточного простирания. Береговая зона совпадает с разрывами северо-западного и северо-восточного простирания. В.В. Юдин [2009] выделяет в этом районе Каябашский олистолит, ограниченный Мраморным ретронадвигом с южным падением сместителя под углами 20–30°.

**Балаклавская впадина** ( $III_3$ ) протягивается от Балаклавской бухты до долины р. Черная и имеет ширину более 4 км. Она осложнена многочис-

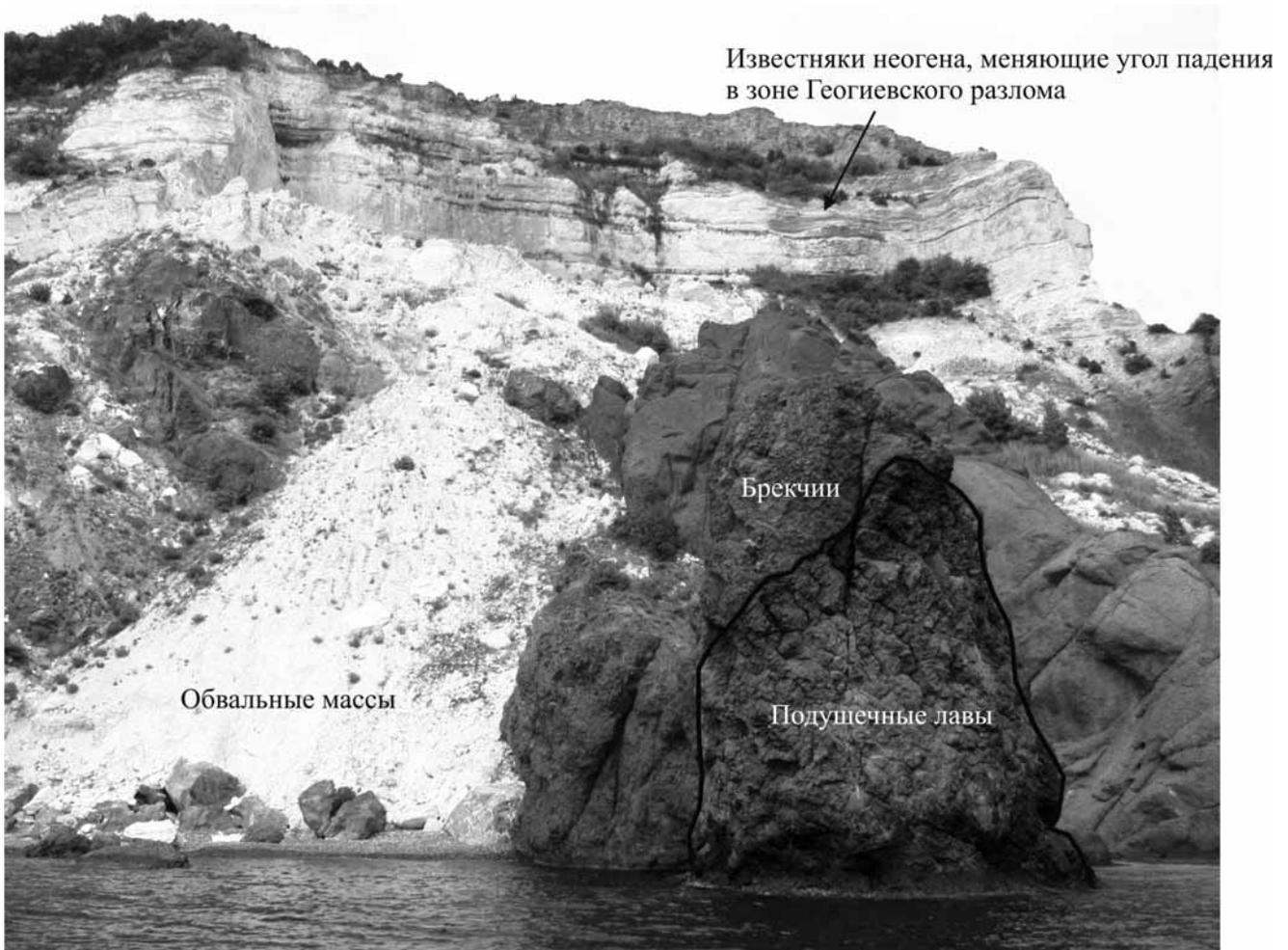


Рис. 6. Изменение угла наклона известняков неогена в зоне влияния Георгиевского разлома на северо-запад от мыса Айя-Бурун (точка 5 на рис. 1)

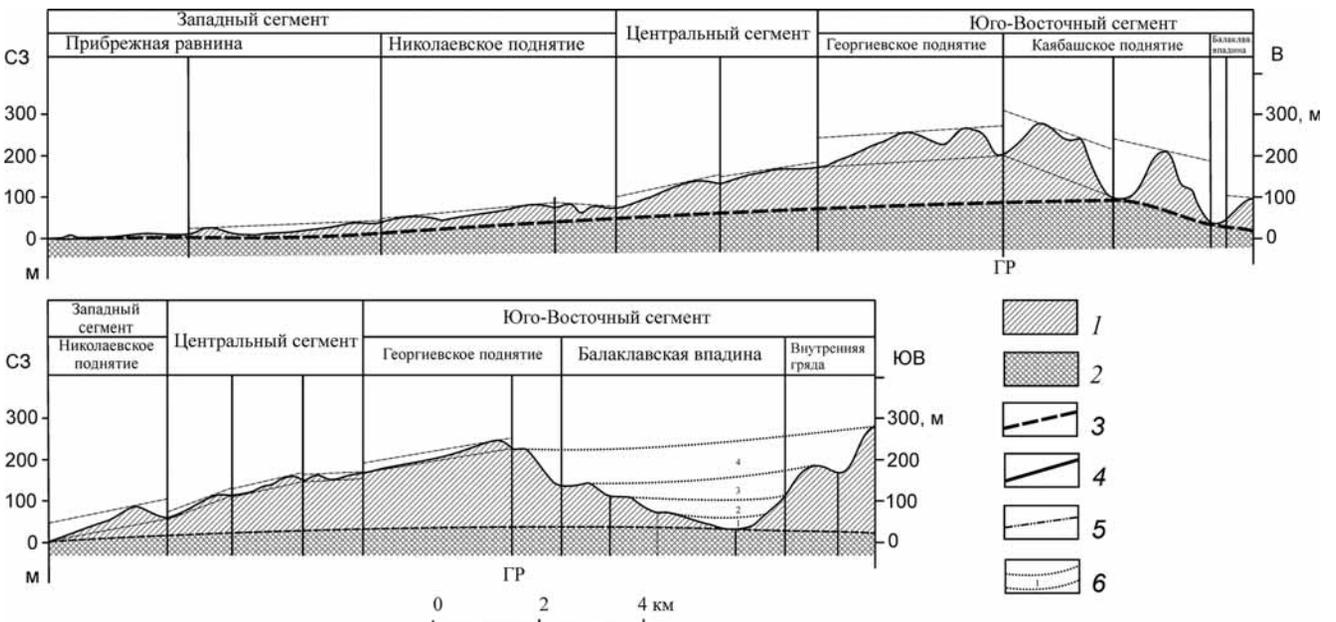


Рис.7. Геоморфологические профили через Гераклейский полуостров: А — по линии 1–1'. Б — по линии 2–2': 1 — массив, затронутый эрозийным расчленением; 2 — массив, не затронутый процессами эрозии; 3 — сопоставительная линия, объединяющая глубину эрозийного расчленения крупными реками; 4 — границы блоков, установленные по геоморфологическим данным; 5 — региональные циклы эрозийного расчленения; 6 — сопоставительные линии реконструкции горного сооружения; 7 — зона Георгиевского разлома

???  
6 или 7??  
И где на рис. А и ??

ленными частными поднятиями, высота которых не превышает 100–150 м. В районе Бакалавской бухты отмечено несколько субширотных разрывов, которые, по мнению В.А. Иванова с соавторами [2009], имеют сдвиговую составляющую. Этот тип перемещений подтверждается деформациями овражно-балочной сети (рис. 1).

Для уточнения выделенных структур были построены геоморфологические продольный (рис. 7, А) и поперечный (рис. 7, Б) профили. Элементы структурно обусловленного рельефа по данным анализа горизонтального расчленения подтверждаются при исследовании вертикального расчленения. На профилях хорошо виден куэстовый рельеф, образованный моноклинально залегающими неогеновыми породами. Поверхность куэсты осложнена зонами трещиноватости, которые разрабатываются овражно-балочной сетью. Наибольшей высоты эта структура достигает в пределах Георгиевского поднятия, представляющего собой зону влияния Георгиевского разлома. На поперечном профиле хорошо дешифрируется Балаклавская впадина, на склонах которой наблюдаются цикловые долины, сохранившиеся в виде уступов. Изменения в строении долин отражают неравномерное и быстрое возрастание скорости поднятия юго-восточной части Гера-

клеяского п-ова, который в целом запрокинут на северо-запад.

**Выводы.** 1. Структурно-геоморфологический анализ показал, что в пределах Гераклеяского п-ова преобладают две системы разрывных нарушений: первая меняет направление с практически субмеридионального на северо-западное; вторая — с север-северо-восточного на северо-восточное.

2. Гераклеяский п-ов разделен на три сегмента — Северо-Западный, Центральный и Северо-Восточный, различающиеся густотой и направлением зон трещиноватости и разрывов, характером овражно-балочной сети, строением береговой зоны.

3. В верхнем структурном этаже неотектонические процессы наиболее интенсивно проявлены над позднеюрско-раннемеловой коллизионной сутурой, образовавшейся при закрытии задугового бассейна с корой океанического типа

4. Выявленные структурно-геоморфологическим анализом разрывы и системы трещин хорошо согласуются с данными полевых исследований. Они играют важную роль при сейсмическом районировании полуострова.

**Благодарности.** Авторы признательны Л.А. Сим и Ю.А. Морозову за обсуждение статьи, что позволило существенно ее улучшить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Борисенко Л.С., Новик Н.Н., Тихоненков О.П., Чебаненко И.И.* Особенности тектоники юго-западной части Горного Крыма в связи с прогнозом сейсмической опасности // Тектоника и стратиграфия, 1982. Вып. 23. С. 11–16.

*Брянцева Г.В., Романовская М.А.* Влияние разнонаправленных геотектонических движений южного берега Крыма на особенности развития склоновых процессов // Экологическое равновесие: геоэкология, краеведение, туризм: Мат-лы VIII междунар. Науч.-практ. конф. СПб: 2017. С. 346–350.

*Бызова С.Л.* Некоторые вопросы тектоники Горного Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1980. № 6. С. 15–25.

*Верховцев Б.Г.* Новейшие платформенные геоструктуры Украины и динамика их развития: Автореф. докт. дисс. Киев, 2007. 20 с.

*Вольфман Ю.М.* Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма // Геофизический журн. 2015. Т. 37, № 1. С. 100–120.

*Демина Л.И., Промылова М.Ю., Короновский Н.В., Царев В.В.* Первая находка серпентинитов в коренных обнажениях Горного Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 12–20.

*Иванов В.Е., Ломакин И.Э., Тополок А.С.* и др. Особенности тектоники Юго-Западного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 4. С. 27–39.

*Корчуганова Н.И., Костенко Н.П., Межеловский И.Н.* Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. М.: МПР РФ, Геокарт, МГГА, 2001. 212 с.

*Ломакин И.Э., Иванов В.Е., Кочелав В.В.* Тектонические факторы развития новейших геодинамических процессов Юго-Западного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 3. С. 61–74.

*Ломакин И.Э., Иванов В.Е., Тополок А.С., Ефимцева Л.Л.* Новые данные о геологическом строении побережья Юго-Западного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 4. С. 30–39.

*Муровская А., Инполит Ж.-К., Шеремет Е., Егорова Т.* Современные и палеонапряжения в пределах северной окраины Черного моря и Горного Крыма в мезо-кайнозой-квартере (по механизмам очагов землетрясений и полевым тектонофизическим данным) // Геофизический журн. 2018. Т. 40, № 1. С. 42–65.

*Промылова М.Ю., Демина Л.И., Бычков А.Ю.* и др. Офиолитовая ассоциация Юго-Западного Крыма // Геотектоника. 2016. № 1. С. 25–40.

*Промылова М.Ю., Демина Л.И., Гуцин А.И., Короновский Н.В.* Типы брекчий офиолитовой ассоциации Юго-Западного Крыма и их значение для палеогеодинамики региона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. № 3. С. 35–40.

*Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А.* Новые карты сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // Геофизический журн. 2006. Т. 28, № 3. С. 54–77.

*Санин А.Ю.* Береговые морфосистемы Крыма и их рекреационное использование: Автореф. канд. дисс. М., 2014. 30 с.

*Юдин В.В.* Геологическая карта и разрезы Горного, Предгорного Крыма. Масштаб 1:200 000. Симферополь, 2009.

*Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. 333 с.

*Nikisin A.M., Wannier M., Alekseev A.S.* et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the East-

ern Black Sea region // Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus // Geol. Soc. London Spec. Publ. 2017. Vol. 428. P. 241–264.

*Sylvester A.G.* Strike-slip faults // Geol. Soc. Amer. Bull. 1988, Vol. 100. P. 1666–1703.

Поступила в редакцию 00.00.2019

Поступила с доработки 00.00.2019

Принята к публикации 00.00.2019

УДК 55(1/9)

А.О. Агибалов<sup>1</sup>

## РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ КАК ИНДИКАТОР СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Установленные в ходе полевых исследований разрывные нарушения в четвертичных отложениях свидетельствуют о том, что на территории Северного Приладожья в новейшее время происходили сейсмические события магнитудой не менее 5. Данные компьютерного моделирования показали, что современная сейсмичность этой территории связана с новейшей активизацией докембрийских дизъюнктивных структур в обстановке северо-западного сжатия. С помощью анализа рельефа выделены разрывные нарушения, ограничивающие котловину Ладожского озера и относящиеся к активным неотектоническим структурам.

*Ключевые слова:* палеосейсмодислокации, компьютерное моделирование, Приладожье.

Faults in the quarterly deposits established during field investigations indicate that seismic events with magnitude of no less than 5 occurred in the Northern Ladoga region during neotectonic time. Computer modeling has shown that the modern seismicity of this territory is associated with the neotectonic activation of Precambrian disjunctive structures in conditions of NW compression. Relief analysis allows us to distinguish faults limiting the basin of the Ladoga Lake, which belongs to active neotectonic structures.

*Key words:* paleoseismodislocations, computer modeling, Ladoga region.

**Введение.** Территория Северного Приладожья (юго-восток Балтийского щита) отличается низкой сейсмической активностью на современном этапе: по приведенным в сейсмическом каталоге Хельсинского университета данным максимальная магнитуда землетрясений за исторический период времени достигала 3,2 [Сейсмический..., 2018]. Однако, по мнению А.А. Никонова и С.В. Шварева, на территории Северного Приладожья возможны сейсмические события с магнитудой  $\geq 6$  [Никонов, Шварев, 2015; Родкин и др., 2012]. Для проверки обоснованности высказанной точки зрения автором были изучены разрезы четвертичных отложений на предмет наличия следов древних землетрясений. Для того чтобы предложить решение проблемы о возможных механизмах возникновения сейсмических событий, выполнено компьютерное моделирование с помощью программы RMS 2013. Исследования, включающие изучение признаков древних землетрясений, компьютерное тектонофизическое моделирование, анализ рельефа, позволяют рассматривать Северное Приладожье как область проявления сейсмических событий с магнитудой  $\geq 5$ , связанных с неотектонической активизацией докембрийского структурного плана в обстановке северо-западного сжатия.

**Материалы и методы исследований.** Новые данные о разрывных нарушениях, проявленных в четвертичных отложениях Северного Приладожья, получены в ходе полевых наблюдений. В июле—

августе 2017 и 2018 гг. автором были изучены разрезы гляциолимнических отложений верхнего неоплейстоцена, вскрытых в заброшенных карьерах. В песках и гравелитах зафиксированы разрывные нарушения, видимая амплитуда смещения по которым варьирует от нескольких сантиметров до 0,7 м.

Компьютерное моделирование, выполненное с помощью программы RMS 2013, позволило рассчитать в относительных величинах значения амплитуды вертикальных и горизонтальных перемещений по разрывам в обстановке северо-западного сжатия (азимут простирания оси максимального сжатия  $310^\circ$ ), которое, судя по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений, преобладает на рассматриваемой территории в новейшее время [Slunga, 1991]. В качестве исходных материалов для построения модели использованы отметки рельефа [Цифровая..., 2009; Карта..., 1988], схема разрывных нарушений [Хазов и др., 2004], а также физико-механические характеристики среды (значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения). Выбор для моделирования схемы разрывных нарушений, приведенной в работе [Хазов и др., 2004], обусловлен тем, что на ней показаны крупные разрывные нарушения, находящиеся отражение в современном рельефе и проявляющие сейсмическую активность [Агибалов и др., 2017].

Методика моделирования заключалась в том, что на поверхность рельефа, построенную в формате Grid, была нанесена сетка разрывных нару-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; e-mail: Agibalo@yandex.ru

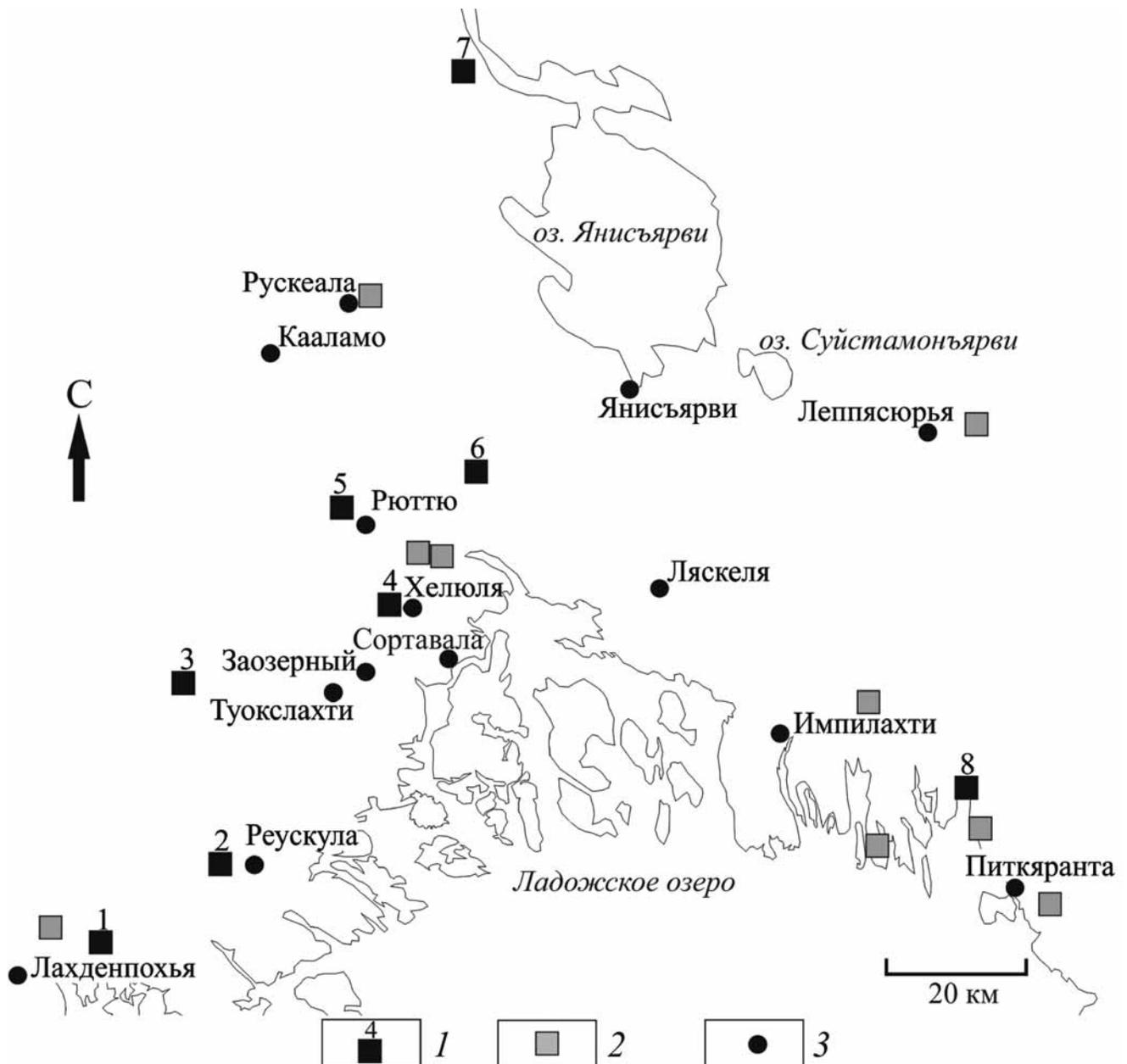


Рис. 1. Схема расположения песчаных карьеров, в которых изучены разрывные нарушения: 1 — точки наблюдения и их номера; 2 — каменные карьеры, в которых проводились взрывные работы; 3 — населенные пункты

шений и задана ориентировка оси максимального сжатия. С помощью модуля «Fracture modeling» выполнен расчет относительных величин перемещений по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , взятых по модулю. Все величины перемещений вычислены без учета знака и приняты как положительные, чтобы выявить участки, в пределах которых горизонтальные и вертикальные смещения максимальны. Построенная схема суммарных перемещений по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  сопоставлена с характером распределения современной сейсмичности. При проведении расчетов сделаны определенные допущения о геометрии разрывных нарушений (которые считаются непересекающимися) и величинах напряжений, принятых как достаточные для возникновения новых разрывов малой протяженности. Более

подробно методика моделирования рассмотрена в [Руководство..., 2012] и в статье [Агибалов и др., 2017]. Анализ рельефа позволил оценить, насколько отчетливо докембрийские дизъюнктивные структуры проявлены в современном рельефе по комплексу признаков: крутизне склонов; плотности вертикальных стенок и уступов (вычисленной с помощью программы ArcGis как отношение длины линейных объектов к площади расчетной ячейки); суммарной длине рек и линеаментов, ориентированных вдоль направлений простиранья соответствующих разрывов. Исходными материалами для исследований служили цифровая модель рельефа [Цифровая..., 2009], топографические карты масштаба 1 : 200 000, а также ранее опубликованные схемы блоковой делимости

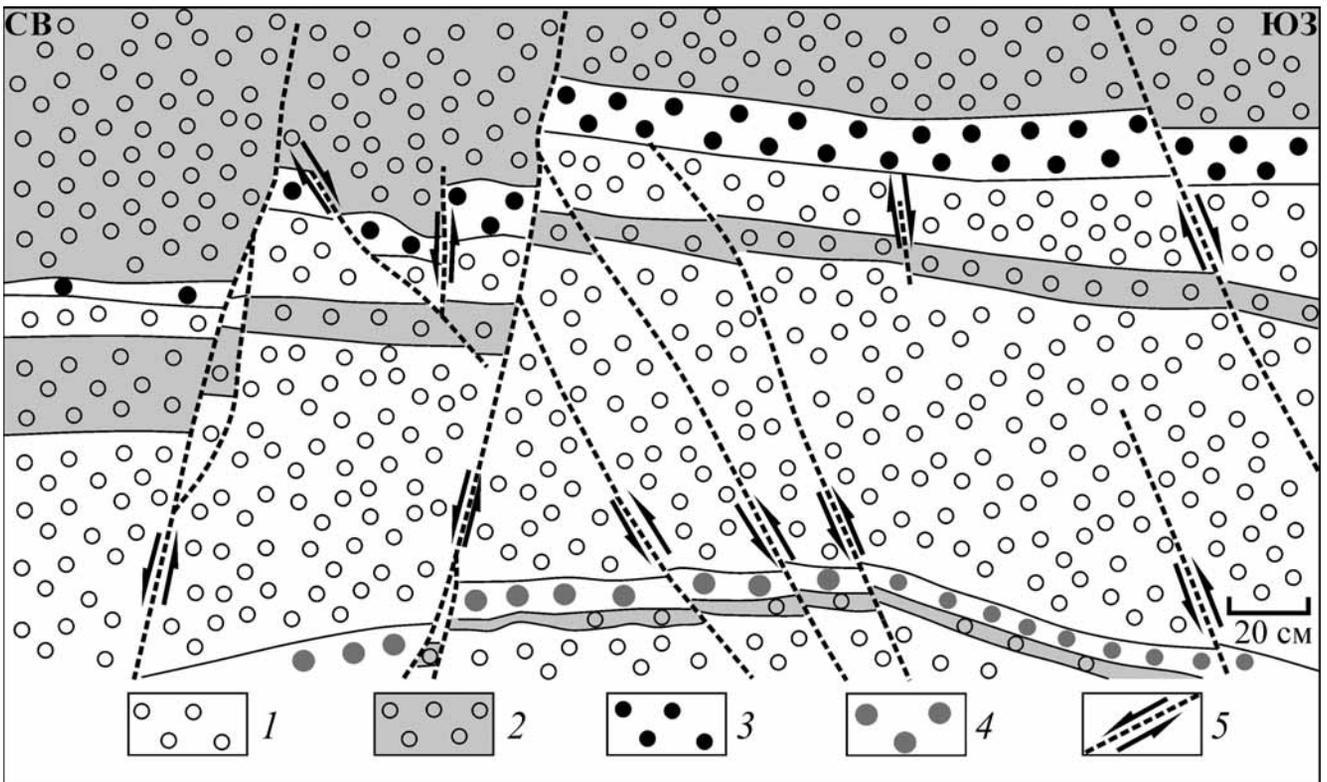


Рис. 2. Разрывные нарушения в песках верхнего неоплейстоцена, зафиксированные в районе оз. Янисъярви: 1 — тонкослойные пески; 2 — маркирующий слой серых среднезернистых песков; 3 — маркирующий слой желтых средне-крупнозернистых песков; 4 — маркирующий слой светло-желтых средне — мелкозернистых песков; 5 — разрывные нарушения и направления смещения по ним

Северного Приладожья [Агибалов и др., 2017] и линеаментов дна Ладожского озера [Анохин и др., 2016]. Методика работ включала в себя построение расчетных ячеек прямоугольной формы размером 3,2×11,2 км. Каждая ячейка была расположена таким образом, что поверхность сместителя разрыва разделяла ее короткие стороны на отрезки равной длины. Построенным ячейкам присвоены значения упомянутых выше параметров рельефа. Таким образом были выделены наиболее четко выраженные в рельефе разрывные нарушения, которые относятся к геодинамически активным неотектоническим структурам. С некоторыми из них связаны современные сейсмические события малой магнитуды [Сейсмический..., 2018].

**Результаты исследований и их обсуждение.**

В ходе полевых наблюдений зафиксированы разрывные нарушения, проявленные в верхне-неоплейстоценовых отложениях, разрезы которых изучены в заброшенных карьерах (таблица; рис. 1). Выявленные дизъюнктивные структуры можно разделить на три кинематические группы, отличающиеся по типу напряженного состояния. К первой группе относятся сбросы запад-юго-западного простирания, зафиксированные в районах пос. Хелюля, оз. Янисъярви (рис. 2), г. Лахденпохья (рис. 3), а также сбросы северо-восточного простирания, наблюдавшиеся в районе г. Питкяранта. Эти разрывы, сформировавшиеся в обстановке

субмеридионального растяжения, наиболее распространены, хорошо выражены в обнажениях и характеризуются высокими значениями видимой амплитуды смещения (до 0,7 м). Поверхности сместителей разрывов этой группы часто разветвляются, образуя сложные структурные формы. Во вторую кинематическую группу объединены сбросы северо-восточного простирания, изученные в районе оз. Рюттъярви и пос. Реускула, возникшие в обстановке юго-западного растяжения. К третьей группе отнесены редкие малоамплитудные взбросы запад-северо-западного простирания, которым соответствует обстановка пологого север-северо-восточного сжатия. Они были встречены в районе оз. Янисъярви и пос. Туокслаhti. Более подробное описание разрывных нарушений для каждой точки наблюдения приведено в статье [Агибалов и др., 2018].

Изученные разрывные нарушения можно интерпретировать как первичные палеосейсмодислокации, возникающие при землетрясениях с магнитудой  $\geq 5$  [Палеосейсмология, 2011]. Это значение превышает магнитуду Восточно-Ладожского землетрясения 1921 г., составляющую, по оценкам А.А. Никонова,  $4,5 \pm 0,3$  [Никонов, 2005]. По другим оценкам наибольшее значение магнитуды, установленное за исторический период времени на территории Приладожья, достигает 3,2 [Сейсмический..., 2018]. Промышленные взрывы

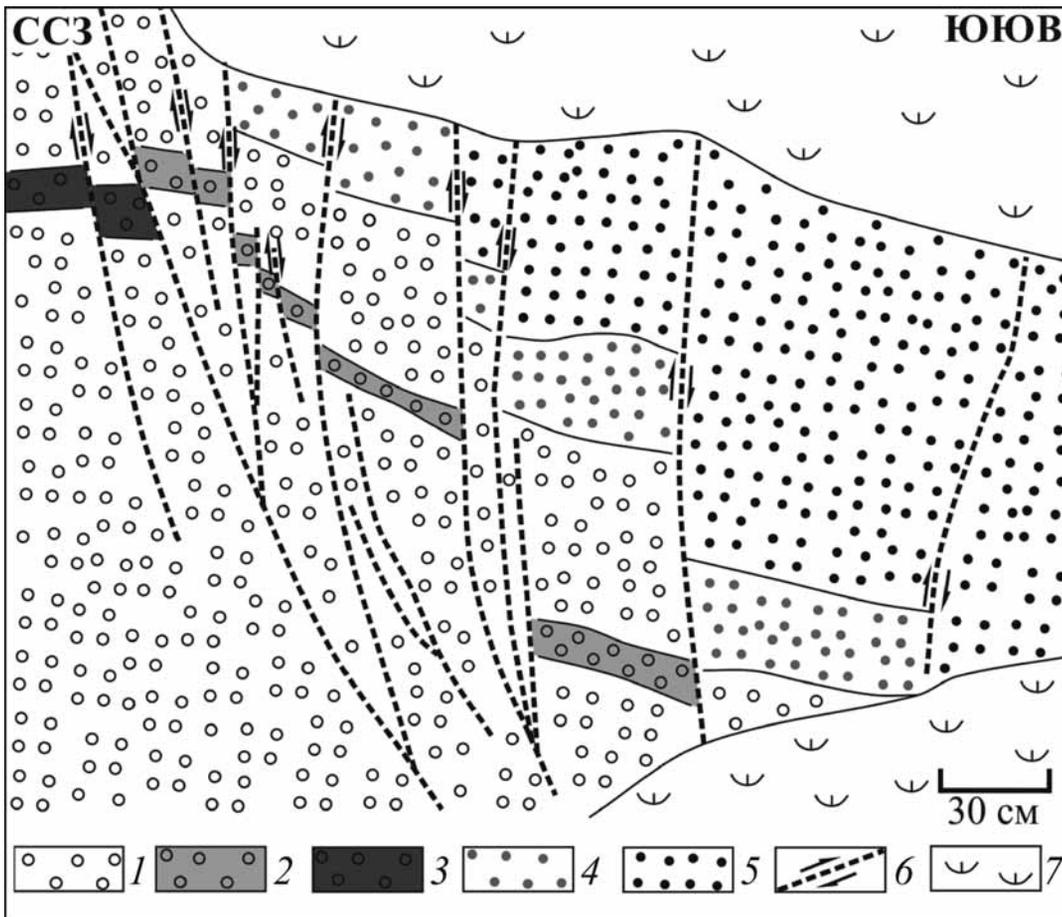


Рис. 3. Разрывные нарушения в песках верхнего неоплейстоцена, зафиксированные в районе г. Лахденпохья: 1 — пески с плохо выраженной слоистостью; 2 — маркирующий слой светло-серых песков с плохо выраженной слоистостью; 3 — маркирующий прослой серых слоистых крупнозернистых песков; 4 — маркирующий слой серых тонкослоистых среднезернистых песков; 5 — маркирующий прослой серых тонкослоистых средне-крупнозернистых песков; 6 — разрывные нарушения и направления смещения по ним; 7 — задернованные участки

в карьерах нельзя рассматривать в качестве причины формирования рассматриваемых разрывных структур по следующим соображениям. Самые сильные взрывы в Карелии производятся в карьере г. Костомукша [Шаров, 2011], не показанном на карте очагов сейсмичности, индуцированной инженерной деятельностью [Землетрясения..., 2007]. Ближайшие источники техногенной сейсмичностью — рудники в городах Заполярный и Ковдор [Землетрясения..., 2007], максимальные магнитуды взрывов на территории которых достигали 3,3 в 1990-х гг. [Асминг и др., 2010].

Кроме того, некоторые каменные карьеры, в которых проводились взрывные работы, а также ряд песчаных карьеров (где находятся точки наблюдения) расположены вблизи населенных пунктов. Эти участки не могли подвергаться значительному техногенному сейсмическому воздействию, связанному с промышленными взрывами, утилизацией боеприпасов и т.п. по соображениям безопасности. В работах [Ассиновская, 2011; Шаров, 2011] показано, что локальные сотрясения на территории Карелии в ряде случаев обусловлены нетектоническими факторами: морозобойными ударами, происшедшими при резкой смене температуры воздуха на берегах крупных озер; и колебаниями уровня воды в Ладожском озере, связанными с изменением атмосферного давления. Однако интенсивности этих событий недостаточно

для возникновения дизъюнктивных нарушений в рыхлых грунтах [Палеосейсмология, 2011].

Альтернативный вариант интерпретации рассмотренных дизъюнктивных структур предполагает, что они возникли в результате просадок и оползания грунтов при таянии погребенного льда [Горбатов, Никонов, 2015]. Однако этот механизм не позволяет объяснить наличие определенных закономерностей ориентировки поверхностей сместителей разрывных нарушений, которые можно подразделить на кинематические группы. Кроме того, просадки и оползания грунтов не могли привести к формированию разрывов со взбросовой кинематикой, зафиксированных в районах пос. Рюттю, оз. Рюттюярви, пос. Туокслаhti и оз. Янисьярви. [Агибалов и др., 2018]. Поскольку поздне-неоплейстоценовые гляциолимнические отложения не перекрыты мореной [Степанов и др., 2014], изученные деформации не относятся к криогенным дислокациям. Оползневые процессы также нельзя рассматривать в качестве универсального механизма формирования рассматриваемых разрывных нарушений, так как в некоторых песчаных карьерах, расположенных рядом с крутыми склонами, не зафиксированы дизъюнктивные структуры в четвертичных образованиях.

Таким образом, анализ разрывных нарушений указывает на то, что на территории Северного Приладожья в новейшее время происходили

сейсмические события магнитудой  $\geq 5$ . По данным [Палеосейсмология, 2011], это минимальное значение магнитуды, необходимое для формирования первичных палеосейсмодислокаций. Сейсмические события могли быть обусловлены гляциоизостатическими движениями [Родкин и др., 2012], интенсивность которых снижается со времени последнего оледенения, поэтому параметры отмеченных палеосейсмодислокаций неправомерно использовать для характеристики современной сейсмичности [Несмеянов и др., 2011].

Для решения задачи о возможных механизмах проявления сейсмичности за исторический период наблюдений выполнено компьютерное моделирование. Установлено, что при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия наибольшие значения суммарных относительных величин горизонтальных и вертикальных смещений, взятых по модулю, приурочены к восточной части котловины Ладожского озера (рис. 4). В пределах этой области расположен эпицентр Восточно-Ладожского землетрясения, произошедшего 30 ноября 1921 г. магнитудой 4,5 — самого крупного сейсмического события, зафиксированного за исторический период наблюдений [Никонов, 2005]. Выявлена численная корреляция между суммарными величинами перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , взятыми по модулю, и магнитудами землетрясений, интерполированными на всю рассматриваемую территорию. Коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,72, что указывает на взаимосвязь сейсмичности и дизъюнктивных структур, развивающихся в современном поле напряжений.

О геодинамической активности древних разрывных нарушений свидетельствуют следующие соображения. Северо-западное и юго-восточное ограничения котловины Ладожского озера выделены в качестве активных разломов [Бачманов и др., 2017; Trifonov, 1996]. Этим структурам соответствуют сейсмолинеаменты [Никонов, Шварев, 2015] и наиболее проницаемые зоны по данным гелиевой съемки [Схема..., 1983]. Выполненный

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Девяткина А.С. Оценка влияния современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 791–807.

Агибалов А.О., Сенцов А.А., Бардышев Г.П., Зайцев В.А. Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор новейшей сеймотектонической активности территории // Мат-лы науч. конф. «Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология» (10–11 сентября 2018 г.). М.: Перо, 2018. С. 38–56.

Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А. Особенности направленности линейных форм рельефа дна Ладожского озера // География: развитие науки и обра-

автором статьи анализ рельефа позволяет сделать вывод о том, что разломы, ограничивающие впадину Ладожского озера с северо-запада и востока, относятся к числу наиболее отчетливо проявившихся в рельефе дизъюнктивных структур, выделенных по комплексу геоморфологических признаков: крутизне склонов, плотности вертикальных стенок и уступов, длине линеаментов, ориентированных вдоль направлений простирания разрывов (рис. 5). Приуроченность эпицентров современных землетрясений к этим разломам указывает на то, что прямое отражение последних в рельефе обусловлено не только экзогенными факторами, но и неотектоническими процессами.

**Заключение.** Данные полевых наблюдений, в ходе которых были изучены разрывные нарушения в рыхлых четвертичных отложениях, позволяют сделать вывод о том, что на территории Северного Приладожья в новейшее время происходили сейсмические события магнитудой  $\geq 5$ . Вероятно, они были обусловлены гляциоизостатическими движениями. Согласно данным компьютерного моделирования современная сейсмичность связана с активизацией древних разрывных нарушений в новейшее время. Этот процесс реализуется в обстановке северо-западного сжатия. По комплексу геоморфологических признаков выделяются разрывные нарушения, которые ограничивают впадину Ладожского озера с северо-запада и востока. Они относятся к развивающимся неотектоническим структурам, проявляющим сейсмическую активность.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН Ю.А. Морозову, научному сотруднику ИФЗ РАН А.А. Сенцову и студенту МГУ имени М.В. Ломоносова Г.П. Бардышеву за помощь в проведении полевых исследований.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-35-00359 «Оценка новейшей и современной геодинамической активности докембрийских купольно-надвиговых структур Приладожья»).

зования. Ч. I / Отв. ред. В.П. Соломин, В.А. Румянцев, Д.А. Субетто. СПб.: Изд-во РГПУ имени А.И. Герцена. 2016. С. 108–117.

Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения сейсмической опасности региона // Вестн. Мурманского гос. техн. ун-та. 2010. Т. 13, № 4–2. С. 998–1007.

Ассиновская Б.А., Карпинский В.В., Недошивин С.А. Необычное землетрясение 30 июля 2010 года на Ладожском озере // Геориск. 2011. № 1. С. 58–62.

Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 711–736.

Горбатов Е.С., Никонов А.А. Дислокации в озерно-ледниковых отложениях Ленинградской области:

феноменология, типизация, вопросы генезиса // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Мат-лы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара / Отв. ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: ИФЗ, 2015. С. 67–73.

Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Шукина. Кн. 2. Микросейсмичность. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 96 с.

Карта глубин Ладожского озера. Масштаб 1 : 250 000. М.: ГУГК, 1988.

*Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Воейкова О.А., Донцова Г.Ю.* Сейсмичность северо-западной части Русской плиты и ее гляциоизостатическая природа // Геоэкология, инженерная геология, геоэкология. 2011. № 2. С. 141–156.

*Никонов А.А.* Восточно-Ладожское землетрясение 30 ноября 1921 года // Физика Земли. 2005. № 7. С. 1–5.

*Никонов А.А., Шварев С.В.* Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Мат-лы междунар. конф. «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности» (23–25 сентября 2015 г.) / Ред. В.С. Имаев. Нерюнгри: Изд-во Технического ин-та (ф) СВФУ, 2015. С. 243–251.

Палеосейсмология / Под ред. Д.П. Мак-Калпина. Т. 1. М.: Научный мир, 2011. 560 с.

*Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В.* Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика, 2012. Т. 3, № 3. С. 203–237.

Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)», 2012. URL: [www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2](http://www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2) (дата обращения: 10.10.2018).

Сейсмический каталог Хельсинкского университета. URL: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php> (дата обращения: 10.10.2018).

*Степанов К.И., Санин Д.М., Санина Г.Н.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. 2-е изд. Карельская серия. Листы Р-35-XXIV, Р-36-XIX. Объясн. записка. СПб., 2004. 230 с.

Схема проницаемости земной коры европейской части СССР по данным гелиевых исследований. Масштаб 1 : 2 500 000 / Ред. А.Н. Еремеев. М.: ВИМС, 1983.

*Хазов Р.А., Шаров Н.В., Исанина Э.В.* Глубинное строение и металлогения Приладожья // Геол. и полезные ископаемые Карелии. 2004. Вып. 7. С. 55–74.

Цифровая модель рельефа. URL: [http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_srtm30.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi) (дата обращения: 10.10.2018)

*Шаров Н.В.* Сейсмический мониторинг природных и техногенных событий на территории Карелии // Геология Карелии от архея до наших дней: Мат-лы докл. всеросс. конф., посвященной 50-летию Института геологии КарНЦ РАН (24–26 мая 2011 г.). Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2011. С. 199–203.

*Slunga R.S.* The Baltic shield earthquakes // Tectonophysics. 1991. Vol. 189. P. 323–331.

*Trifonov V.G.* The Map of Active Faults in Eurasia: Principles, Methods, and Results // J. Earthquake Prediction Res. 1996. Vol. 5, N 3. P. 326–347.

Поступила в редакцию 18.10.2018

Поступила с доработки 00.00.2019

Принята к публикации 00.00.2019

УДК 550.34+552.4 (470.5)

Ал.В. Тевелев<sup>1</sup>, Арк.В. Тевелев<sup>2</sup>, А.О. Хотылев<sup>3</sup>, И.А. Прудников<sup>4</sup>,  
И.А. Кошелева<sup>5</sup>, Е.А. Володина<sup>6</sup>, В.М. Мосейчук<sup>7</sup>

## ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РАЙОНЕ КАТАВ-ИВАНОВСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕНТЯБРЕ 2018 Г. (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Рассмотрены структурные особенности Катавско-Юрюзанской зоны разрывов. По анализу мезоструктур определены палеополя напряжений, в которых преобладало горизонтальное северо-западное сжатие. Проанализированы данные о землетрясениях, произошедших в сентябре 2018 г. в районе г. Катав-Ивановск. Выявлены противоречия в определении координат эпицентров и механизмов очагов землетрясений, вычисленных разными геологическими службами. Показано, что обстановка правосторонней транспрессии, при которой сформировалась структура северо-западной части Башкирского мегантиклинория, сохраняется и в настоящее время.

*Ключевые слова:* землетрясение, механизм очага, поле напряжения, нодальная плоскость, транспрессия, Катав-Ивановск, Южный Урал.

The structural features of the Katavsko-Yuryuzan faults zone are considered. According to the analysis of mesostructures, paleopole stresses, where horizontal northwest compression prevailed, were determined. Data on earthquakes, that occurred in September 2018 near the town of Katav-Ivanovsk, has been analyzed. Contradictions in determining the coordinates of epicenters and mechanisms of earthquakes foci calculated by different geological services were revealed. It is shown, that the situation of right-sided transpression, in which the structure of the northwestern part of the Bashkir meganticlinorium was formed, continues up to the present moment.

*Key words:* earthquake, source mechanism, stress field, nodal plane, transpression, Katav-Ivanovsk, Southern Urals.

**Введение.** Западный склон Южного Урала отличается очень слабой сейсмичностью, хотя небольшие, но заметные землетрясения (магнитуда от 4 до 6) случаются. Последние такие землетрясения произошли 4 и 29 сентября 2018 г. в районе г. Катав-Ивановск. Их магнитуда по разным оценкам составляла от 4,2 до 5,4. Землетрясения не привели к разрушениям, однако некоторые серьезные последствия толчков все-таки были: трещины в стенах, осыпавшаяся штукатурка, разбитая посуда, а также возникновение грязевого потока и резкое изменение дебита родников, вплоть до их полного пересыхания.

По данным [IRIS..., 2018] (Incorporated Research Institutions for Seismology, USA), с 1990 г. по настоящее время на Южном Урале зафиксировано 54 землетрясения, из которых только 5 имели магнитуду  $\geq 4$ , причем 2 из них произошли

еще 28 мая 1990 г. Таким образом, между более или менее сильными землетрясениями прошло почти 30 лет, т.е. это явление на Южном Урале действительно редкое.

Задача исследования состояла в том, чтобы установить соотношение современного поля напряжений, вызвавшего упомянутые землетрясения, с палеополями напряжений, выявленными в результате изучения мезоструктурных элементов рифейских комплексов, слагающих район землетрясений.

**Структурные особенности района землетрясений.** Упомянутые землетрясения были локализованы в зоне сочленения Башкирского мегантиклинория, сложенного рифейскими образованиями, и Предуральского краевого прогиба, сложенного флишево-молассовыми комплексами среднего карбона–перми (рис. 1). Структура Башкирского

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* [atevelev@rambler.ru](mailto:atevelev@rambler.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* [arctevelev@rambler.ru](mailto:arctevelev@rambler.ru)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, ассистент; канд. геол.-минер. н. *e-mail:* [akhotylev@gmail.com](mailto:akhotylev@gmail.com)

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, аспирант; *e-mail:* [prydnukov@gmail.com](mailto:prydnukov@gmail.com)

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, ст. инженер; *e-mail:* [foxalbit@rambler.ru](mailto:foxalbit@rambler.ru)

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, бакалавр; *e-mail:* [ekaterina.volodina2015@yandex.ru](mailto:ekaterina.volodina2015@yandex.ru)

<sup>7</sup> ООО НТПП «Геопоиск» (г. Челябинск), ген. директор; *e-mail:* [geopoisk2004@mail.ru](mailto:geopoisk2004@mail.ru)

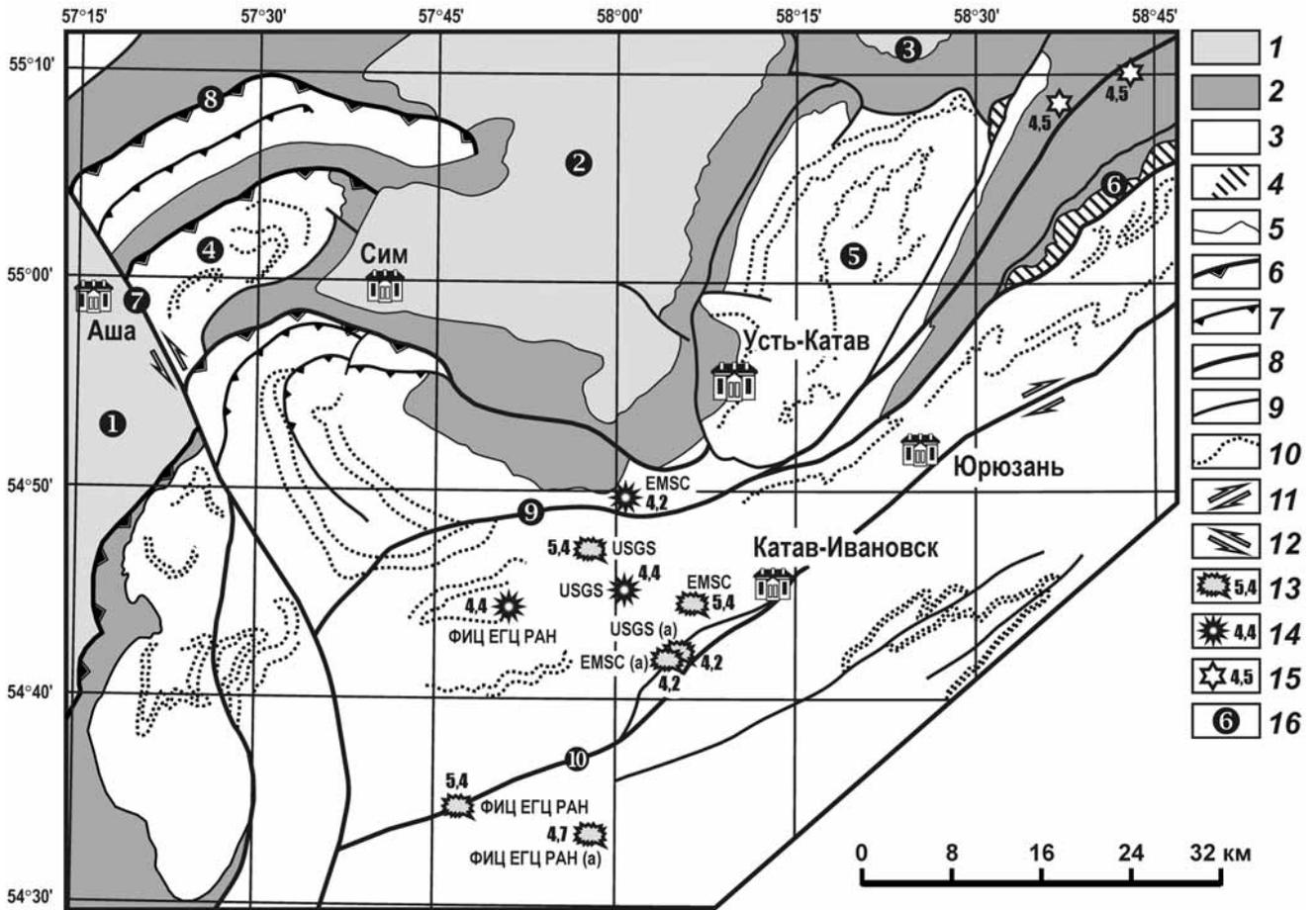


Рис. 1. Структурная схема района землетрясений 1990 и 2018 гг.: 1 — верхнепалеозойские комплексы Предуральского краевого прогиба; 2 — девонско-раннекаменноугольные комплексы чехла Восточно-Европейской платформы; 3 — рифейские комплексы Башкирского мегантиклинория; 4 — пакеты маломощных надвиговых пластин; 5 — стратиграфические границы; 6–7 — надвиги: 6 — главные, 7 — второстепенные; 8, 9 — прочие разрывы: 8 — главные, 9 — второстепенные; 10 — маркирующие горизонты; 11–12 — сдвиги: 11 — правые, 12 — левые; 13–15 — эпицентры землетрясений и их магнитуды: 13 — 05.09.2018, 14 — 29.09.2018, 15 — 28.05.90; 16 — номера структур (1–3 — впадины Предуральского краевого прогиба: 1 — Бельская, 2 — Симская, 3 — Юрюзано-Сылвинская; 4 — Каратауский выступ; 5 — Сулеймановская антиклиналь; 6 — Петропавловский пакет надвигов; 7 — Ашинский левый сдвиг; 8 — Каратауский надвиг; 9, 10 — правые взбросо-сдвиги (9 — Сулейнский; 10 — Бакало-Саткинский)

мегантиклинория осложнена двумя выступами, расположенными северо-западнее, — Каратауским блоком и Сулеймановской антиклиналью. Эти выступы разделяют три структурных элемента Предуральского краевого прогиба: Юрюзано-Сылвинскую, Симскую и Бельскую впадины. Рифейские комплексы интенсивно деформированы и непосредственно в пределах Башкирского мегантиклинория, и в пределах Каратауского выступа. Сулеймановская антиклиналь деформирована существенно меньше, но вместе с Каратауским выступом составляет единый тектонический блок, выдавленный на север [Тевелев и др., 2018]. Этот блок имеет форму тупого клина, сужающегося к югу. Он ограничен на западе Ашинским левым сдвигом, на востоке — Первомайской правосторонней зоной транспрессии, а на севере — фронтальным Каратауским надвигом.

Эпицентры землетрясений локализованы южнее выступов в довольно узкой Катавско-Юрюзанской зоне, ограниченной двумя крупными раз-

рывами восток-северо-восточного простирания — Сулейнским и Бакало-Саткинским. Немного южнее параллельно этой зоне проходит гипотетическая граница форланда тиманид [Пучков, 2010]. Кинематика этих разрывов детально изучена нами ранее по мезоструктурным элементам при проведении региональных геологических исследований, связанных с составлением Государственной геологической карты масштаба 1:200 000 (лист N-40-XI) [Тевелев и др., 2018]. В частности, в районе г. Катав-Ивановск изучены 4 объекта: 1) карьер Башлес, 2) карьер Катав-Ивановского цементного завода, 3) небольшой карьер на северной окраине Катав-Ивановска и 4) серия мелких карьеров на его северо-восточной окраине (рис. 2). Основные выводы из проведенных исследований, важные для решения поставленной задачи, сводятся к следующему.

Складчатая структура рифейских комплексов во многом подчеркивает правосторонние смещения по всей этой зоне: картируются много-

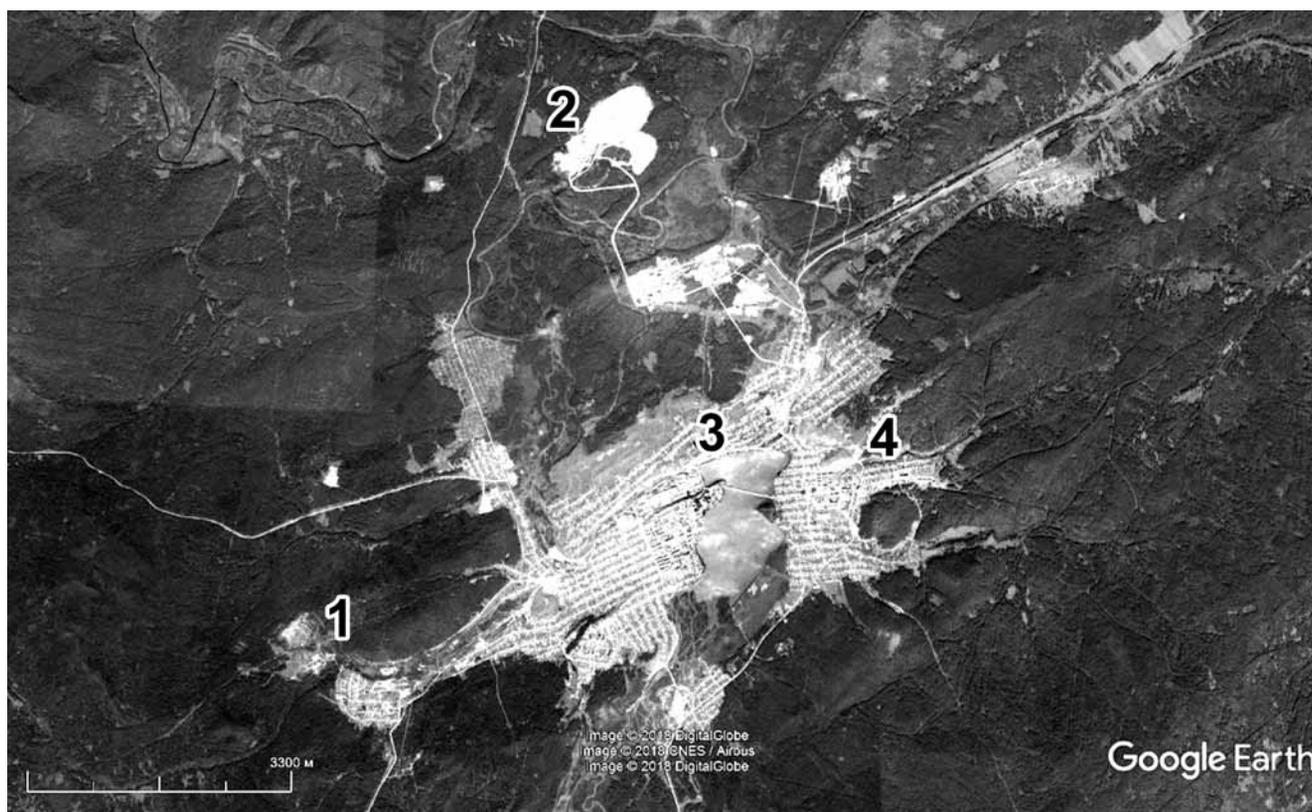


Рис. 2. Схема расположения изученных объектов вокруг Катав-Ивановска (номера объектов соответствуют номерам в тексте)

численные Z-образные подвороты слоев, а также реальные правосторонние смещения маркеров. На первых трех объектах карьерами вскрыты преимущественно известняки катавской свиты верхнего рифея. Среди изученных мезоструктур наиболее четко проявлены зеркала скольжения взбросового и надвигового типов; SF-текстуры; кливаж, в том числе кливаж плейчатости; тектонические брекчии; трещины отрыва; кинкбанды; сколы; кулисные жилы. По этим мезоструктурам восстановлены палеополя напряжения и кинематика разрывов (рис. 3). Во всех случаях ось сжатия оказалась ориентированной по направлению северо-запад–юго-восток (азимут простираения от 300 до 345°). Она либо горизонтальна, либо слабо наклонена на юго-восток. Напряжение растяжения и среднее напряжение близки. Одно из них, как правило, ориентировано почти горизонтально, а другое — почти вертикально. Согласно приведенным данным разрывы интерпретировались как взбросы. Вместе с тем выяснилось, что такая картина наблюдается только на некотором удалении от разрывов в обоих их крыльях, где касательные напряжения почти не проявлены. Непосредственно же в зоне каждого конкретного разрыва хорошо проявлены и касательные напряжения, которые фиксируются по структурным парагенезам, характерным для зон правосторонней транспрессии. Совокупность этих данных позволяет интерпретировать Сулейнский и Бакало-Саткинский разломы как правосторонние взбросо-сдвиги.

В мелких карьерах на северо-восточной окраине Катав-Ивановска, непосредственно в зоне Бакало-Саткинского разлома вскрыта пачка серых мелкокристаллических известняков с частыми прослоями темно-серых, почти черных углеродисто-глинистых, реже кварц-серицитовых и глинистых сланцев общей мощностью до 40 м. Породы относятся к зигазино-комаровской свите среднего рифея. Они интенсивно тектонизированы (местами превращены в тектонические брекчии) и смяты в мелкие дисгармоничные складки (рис. 4). В пределах обнажения породы дезинтегрированы, фактически наблюдаются только хаотически расположенные обрывки складчатой структуры, осложненной малоамплитудными надвигами и взбросами той же юго-западной вергентности. В дезинтегрированной массе встречаются крупные обломки известняков угловатой или сглаженной формы, часть пластов известняков будинирована. В северо-восточной части карьера известняки и сланцы смяты в опрокинутую антиформу с западно-юго-западной вергентностью (осевая поверхность падает по азимуту 76° под углом 72°, а шарнир круто погружается на юго-юго-восток). В некоторых местах пласты смяты в мелкие складки гофрировки с круто залегающими шарнирами. В отдельных блоках сохраняется тонкий кливаж, косо секущий слоистость, а также маломощные зоны интенсивного рассланцевания.

Таким образом, зона Бакало-Саткинского разлома представляет собой тектонический меланж,

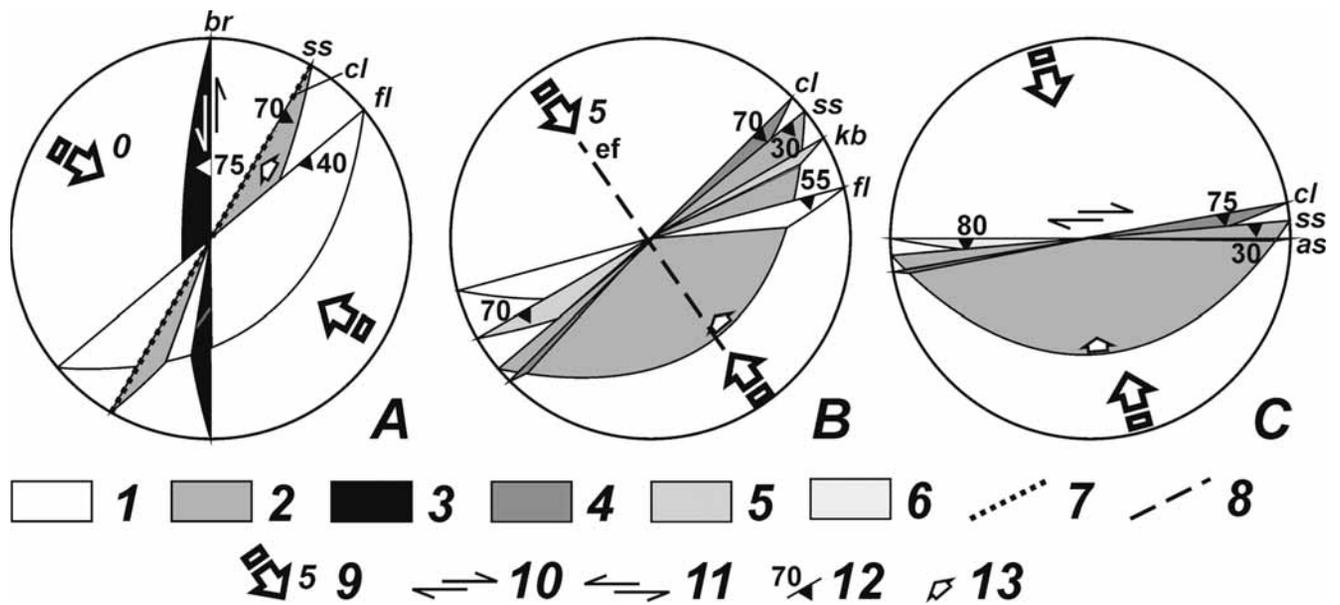


Рис. 3. Стереогаммы мезоструктурных элементов в изученных объектах: *A* — карьер Катав-Ивановского цементного завода, *B* — карьер Башлес, *C* — карьер на северной окраине Катав-Ивановска (нижняя полусфера): 1 — смыкающее крыло флексуры (*fl*); 2 — зеркало скольжения (*ss*); 3 — тектоническая брекчия (*br*); 4 — кливаж плейчаты (*cl*); 5 — кинкбанд (*kb*); 6 — осевая поверхность складок (*as*); 7 — вертикальный кливаж (*cl*); 8 — вертикальные трещины отрыва (*ef*); 9 — направление и угол падения оси сжатия; 10 — правосдвиговая компонента; 11 — левосдвиговая компонента; 12 — угол падения поверхностей; 13 — направление смещения по зеркалам скольжения

сформированный в несколько этапов деформаций. Вероятнее всего, на первом этапе в обстановке субмеридионального сжатия сформировались крупные складки 1-го порядка с крутопадающими крыльями и малыми углами, близкие к изоклиналим. На втором этапе при преобладании касательных напряжений образовались складки 2-го порядка, косые по отношению к крупным складкам 1-го порядка, а также мелкая гофрировка на

крыльях складок 1-го порядка. На третьем этапе в условиях транспрессии складчатая структура была разрушена, сформировался хаотический комплекс тектонического меланжа. Подобная ситуация реконструирована и западнее, в районе г. Юрюзань [Тевелев и др., 2018].

Отдельно стоит вопрос о возрасте описанных деформаций. Известно, что в северо-западной части Башкирского мегантиклинория палеозойские

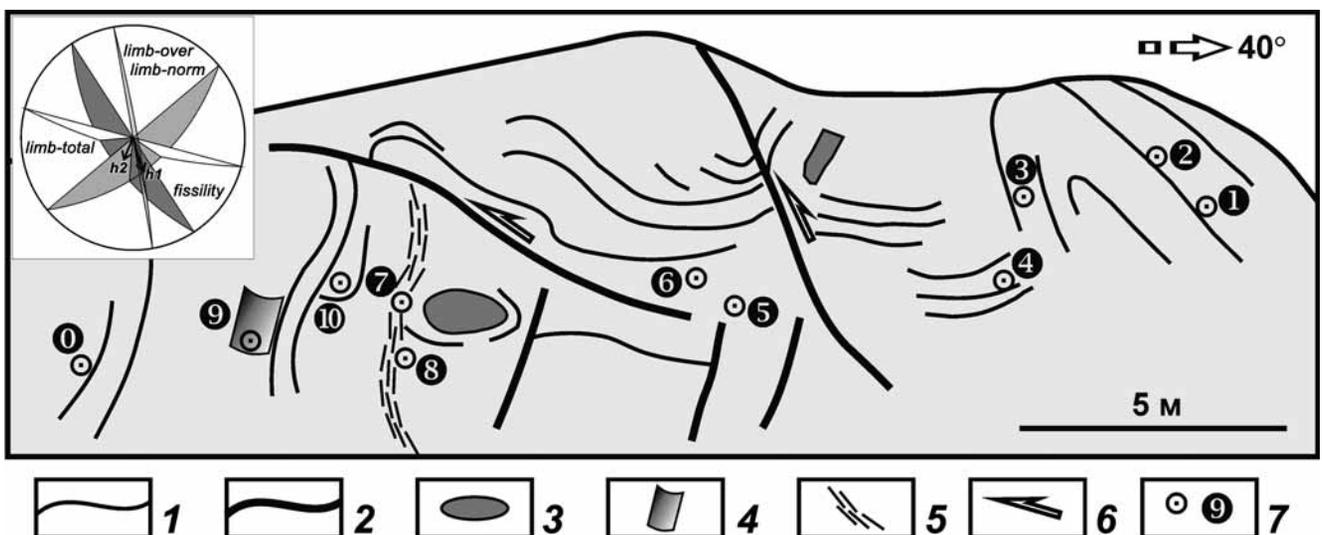


Рис. 4. Структурная схема фрагмента зигзагино-комаровской свиты (северо-западная стенка карьера на северо-восточной окраине Катав-Ивановска) и стереогамма основных структурных элементов: 1 — маркирующие пласти; 2 — разрывы; 3 — обломки известняков; 4 — фрагмент складки гофрировки с крутым шарниром, выпуклой на северо-запад; 5 — зона расланцевания; 6 — направление смещения висячих крыльев разрывов; 7 — точки замеров элементов залегания: номер, азимут и угол падения (0 —  $180 \angle 65$ , 1 —  $140 \angle 55$ , 2 —  $140 \angle 60$ , 3 —  $80 \angle 85$ , 4 —  $270 \angle 30$ , 5 —  $190 \angle 80$ , 6 —  $210 \angle 80$ , 7 —  $235 \angle 55$ , 8 —  $240 \angle 70$ , 9 —  $205 \angle 70$ , 10 —  $195 \angle 85$ ).

На стереогамме: *limb-total* — общее падение слоев структуры; *limb-norm* — «нормальное» крыло антиформы; *limb-over* — «опрокинутое» крыло антиформы; *fissility* — сланцеватость (локальная зона); *h1* — положение шарнира антиформы; *h2* — положение шарниров мелких складок гофрировки

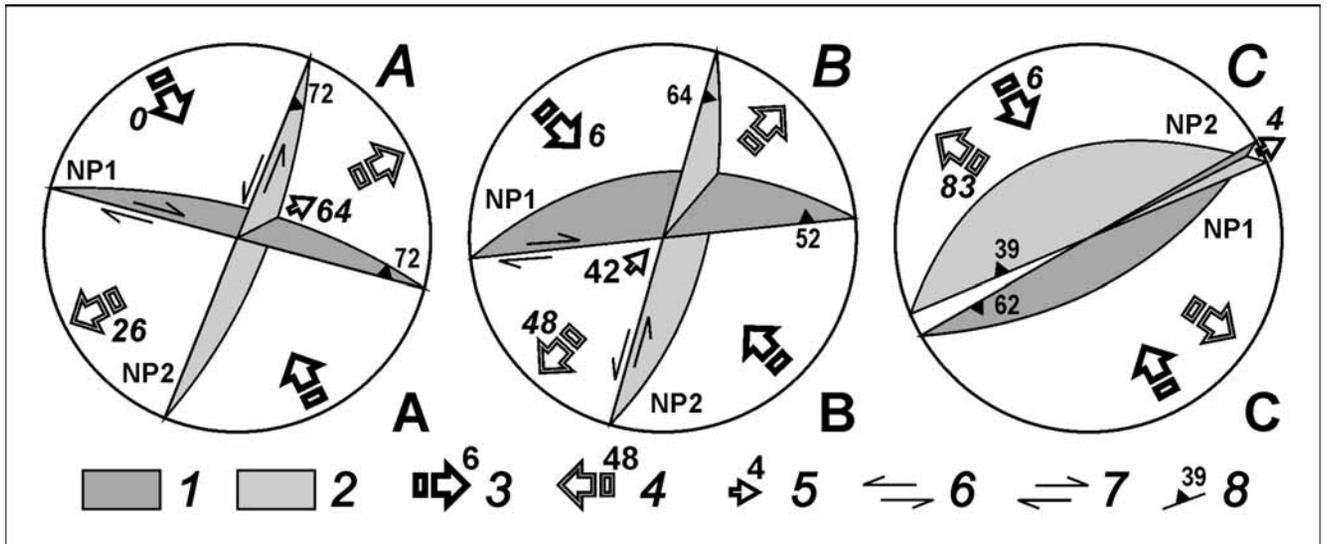


Рис. 5. Стереограммы, отражающие положение нодальных плоскостей и осей главных напряжений (нижняя полушфера): А — по данным ФИЦ ЕГС РАН; В — по данным USGS NIEC; С — по данным GFZ: 1 — нодальная плоскость NP1; 2 — нодальная плоскость NP2; 3 — ось сжатия и угол ее наклона; 4 — ось растяжения и угол ее наклона; 5 — средняя ось и угол ее наклона; 6 — левосторонняя компонента сдвига; 7 — правосторонняя компонента сдвига; 8 — угол наклона нодальной плоскости

образования залегают на рифейских с существенным размывом, но с параллельным несогласием, т.е. описанные деформации не могут быть допалеозойскими. Вероятнее всего, формирование структуры этой части Башкирского мегантиклинория произошло в позднем палеозое во время уральской коллизии, которая началась на границе башкирского и московского веков. Вместе с тем не исключен и более поздний возраст многих деформаций, отвечающий уже альпийскому этапу формирования горной системы Урала.

**Основные параметры Катав-Ивановских землетрясений 2018 г.** Первое землетрясение 2018 г. произошло 5 сентября в 03:58:15 местного времени. По данным ФИЦ ЕГС РАН (Федеральный исследовательский центр единой геофизической службы Российской академии наук) [ФИЦ..., 2018], координаты эпицентра землетрясения: 54°34'48" с.ш. и 57°46'48" в.д. Магнитуда (Мб) составила 5,4. В течение последующих суток было зарегистрировано 19 афтершоков, в том числе один магнитудой 4,7 (координаты: 54°34'12" с.ш. и 57°48'00" в.д.). Отметим, что данные разных геологических служб относительно координат эпицентров существенно различаются (рис. 1). Так, по данным USGS (Геологическая служба США) [USGS..., 2018], координаты эпицентра основного события следующие: 54°47'06" с.ш. и 57°58'05" в.д. (Мб 5,4), а координаты самого сильного афтершока: 54°42'11" с.ш. и 58°04'30" в.д., магнитуда 4,2. Координаты эпицентра основного землетрясения, по данным EMSC (Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр) [EMSC..., 2018] 54°44'24" с.ш., 58°06'36" в.д., Мб 5,4. Все службы оценивают землетрясение как малоглубинное (10 км).

Относительно координат эпицентра землетрясения 29 сентября данные разных служб также рас-

ходятся: ФИЦ ЕГС РАН: 54°44'24" с.ш., 57°51'00" в.д. (Мб 4,4); EMSC: 54°49'48" с.ш., 58°06'00" в.д. (Мб 4,2); USGS: 54°44'52" с.ш., 58°00'50" в.д. (Мб 4,4).

Но не совпадают не только оценки координат землетрясений, разнятся и оценки механизма очага землетрясений [ФИЦ..., 2018]. Согласно данным ФИЦ ЕГС РАН, механизм очага землетрясения 4 сентября 2018 г. рассчитан по знакам первых вступлений продольных волн на 42 станциях, из них на 20 станциях зарегистрированы волны сжатия, на 22 станциях — разрежения. Станции расположены в интервале эпицентральных расстояний от 1,8 до 94,6° и в азимутальном створе от 12 до 355°. Землетрясение возникло под действием близких по величине напряжений сжатия (ориентированы на юг-юго-восток по азимуту (Аз) 154°) и растяжения (ориентированы на запад-юго-запад (Аз 243°). При этом нодальная плоскость NP1 простирается на запад-северо-запад (Аз 285°), а нодальная плоскость NP2 — на север-северо-восток (Аз 16-22°). Смещение по плоскости NP1 — правосторонний сдвиг, а по плоскости NP2 — левосторонний сдвиг (рис. 5).

Несколько иная интерпретация механизма очага землетрясения приводится Национальным центром информации о землетрясениях Геологической службы США (USGS NEIC). Предполагается, что в очаге землетрясения преобладали напряжения сжатия, ориентированные на юго-восток (Аз 137°). При этом смещение по плоскости NP1 (Аз 264) интерпретируется как правосторонний взбросо-сдвиг, а по плоскости NP2 (Аз 247) — как левосторонний взбросо-сдвиг.

Немецкий исследовательский центр наук о Земле (GFZ, Германия) предлагает еще один вариант механизма очага землетрясения. Считает-

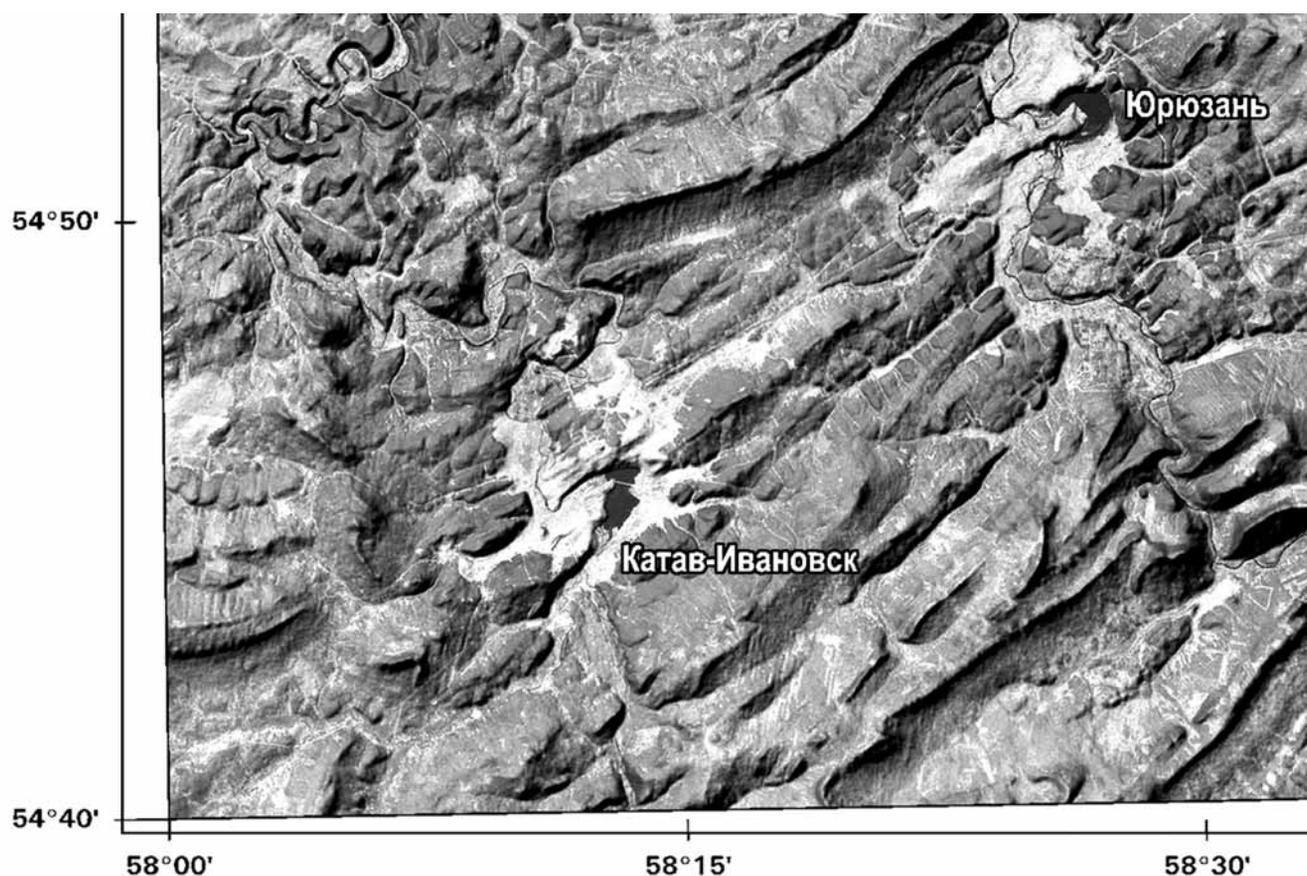


Рис. 6. Фрагмент цветовой композиции RGB 7-го, 2-го и 4-го каналов, совмещенных с рельефом (LANDSAT 7 ETM+), по [Дистанционная..., 2015]

ся, что в очаге преобладали напряжения сжатия, ориентированные по азимуту  $153^\circ$ . Смещение по нодальным плоскостям NP1 (Az 247) и NP2 (Az 60) интерпретируется как взбросовое.

#### Результаты исследований и их обсуждение.

Первое, что бросается в глаза, — значительные расхождения в определении координат эпицентров, определенных разными службами, причем разница составляет 25–30 км. Вероятно, это связано с использованием разных сетей регистрирующих станций. Особенно важно, что станций практически нет в меридиональных секторах от эпицентров. Однако эпицентры довольно кучно расположены на 10–20 км западнее г. Катав-Ивановск. Наиболее далеки от скопления эпицентры, координаты которых получены в ФИЦ ЕГЦ РАН, тем не менее, и они расположены в зоне Бакало-Саткинского взбросо-сдвига.

Что касается механизмов очага землетрясения, то, несмотря на различия, в их интерпретации имеются и сходные черты. Так, пространственное положение оси сжатия в разных вариантах примерно совпадает: эта ось имеет северо-западное простирание, причем она либо горизонтальна, либо полого погружается на юго-восток. Кроме того, простирание оси растяжения примерно одинаково в двух случаях, и только в варианте взбросов она ориентирована практически верти-

кально. Направление смещения по нодальным плоскостям варьирует от сдвигов до взбросов, причем направление сдвига по ним совпадает в обоих вариантах, предусматривающих сдвиговую компоненту, а в двух других вариантах совпадает взбросовая компонента. При этом положение в пространстве промежуточной оси варьирует очень значительно.

Сравнение полей напряжения, вычисленных при определении механизмов очагов землетрясений, а также выявленных при анализе мезоструктурных элементов Бакало-Саткинской зоны разломов, позволяет сделать вывод о их принципиальном сходстве. Прежде всего обращает на себя внимание близкая пространственная ориентировка осей сжатия (северо-западное простирание, субгоризонтальное залегание). Пространственное положение взбросо-сдвигов хорошо коррелирует с положением нодальной плоскости NP1 в интерпретации «взбросы» (GFZ). Выбор нодальной плоскости, совпадающей с разломом, инициирующим землетрясение, как правило, зависит от интерпретатора-геолога. В случае Катав-Ивановских землетрясений 2018 г. этим разломом с очевидностью является Катавско-Юрюзанская зона. С этой же зоной связаны и землетрясения 1990 г. с магнитудой 4,5, произошедшие на 65 км северо-восточнее.

**Заключение.** Таким образом, выяснено, что обстановка правосторонней транспрессии, при которой сформировалась структура северо-западной части Башкирского мегантиклинория, сохраняется и в настоящее время. Современные хребты имеют то же северо-восточное простира-

ние, т.е. рельеф поддерживается за счет северо-западного сжатия (рис. 6). Многочисленные мелкие поперечные долины на склонах хребтов, скорее всего, фиксируют северо-восточное растяжение. Разрывам соответствуют протяженные долины того же простира-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дистанционная основа листа N-40-XI. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info> (даты обращения: сентябрь 2015 — октябрь 2018).

*Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

*Тевелев Ал.В., Прудников И.А., Тевелев Арк.В.* и др. Кинематическая модель формирования Симской мульды Предуральяского краевого прогиба // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 2. С. 23–32.

ФИЦ ЕГС РАН (Федеральный исследовательский центр единой геофизической службы Российской ака-

демии наук). URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

EMSC. Search for earthquakes. URL: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

IRIS. Seismic Monitor. URL: <http://ds.iris.edu/seismon/> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

USGS NEIC. Search Earthquake Catalog. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации

УДК 550.38: 550.8

И.А. Степанов<sup>1</sup>, А.Ю. Казанский<sup>2</sup>, Д.Н. Киселев<sup>3</sup>, Л.Р. Косарева<sup>4</sup>,  
М.А. Рогов<sup>5</sup>, Е.М. Тесакова<sup>6</sup>, Е.В. Щепетова<sup>7</sup>, Я.А. Шурупова<sup>8</sup>

## ВОЗМОЖНОСТИ ПЕТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ НА ПРИМЕРЕ ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ (КЕЛЛОВЕЙ–НИЖНИЙ ОКСФОРД) РАЗРЕЗА МИХАЙЛОВЦЕМЕНТ (РЯЗАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

На основе детального комплексного петромагнитного, литологического и микропалеонтологического изучения опорного для Московской синеклизы разреза Михайловцемент (Рязанская область) реконструированы колебания уровня Среднерусского моря в келловей–раннем оксфорде. По изменению в разрезе петромагнитных параметров установлено 7 петромагнитных интервалов, отвечающих различным этапам развития бассейна. Эти этапы сопоставлены с колебаниями уровня моря, установленными на основании изменения литологического состава пород и особенностей комплексов остракод. В целом характер изменения уровня моря в келловей–оксфорде, установленный по комплексу методов в ходе изучения разреза Михайловцемент, совпадает с глобальными тенденциями.

*Ключевые слова:* петромагнетизм, палеокеанология, седиментология, остракодовый анализ, келловей, оксфорд, Московская синеклиза.

On the basis of detailed, combined rock-magnetic, lithological, and micropaleontological study of the Mikhailovtsement section of the Moscow syncline (Ryazan region), the fluctuations in Central Russian Sea level in Callovian–Early Oxfordian were reconstructed. According to the variations of rock-magnetic parameters over the section, seven rock-magnetic intervals were established which correspond to different stages of basin evolution. These stages are compared with sea level fluctuations established on the basis of changes in the lithology of rocks and the ostracod complexes. In general, the nature of sea level change in Callovian–Oxfordian, revealed by combination of the methods during the study of Mikhailovtsement section coincides with global trend.

*Key words:* rock-magnetism, paleoecology, sedimentology, ostracod analysis, Callovian, Lower Oxfordian, Moscow syncline.

**Введение.** Петромагнитные характеристики осадочных горных пород — весьма чувствительные индикаторы изменений окружающей среды и климата, их можно использовать для стратиграфии и корреляции, а также палеоэкологических реконструкций. Методики таких реконструкций хорошо разработаны для осадочных отложений неоген–четвертичного времени, например [Evans, Heller, 2003], тогда как для более древних отложений публикации немногочисленны [Гужиков, 2013; Пименов и др., 2009; Барабошкин и др.,

2015]. Цель работы — реконструкция условий осадконакопления морских келловейских и нижнеоксфордских отложений разреза Михайловцемент по комплексу петромагнитных данных и ее сравнение с палеоэкологическими и седиментологическими моделями.

**Материалы и методы петромагнитных исследований.** В карьере завода ОАО Михайловцемент в окрестностях г. Михайлов (Рязанская область, 54°12'39» с.ш., 38°56'43» в.д.) расположен одноименный разрез (рис. 1, а), один из опорных раз-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, магистрант; *e-mail:* [ilya\\_stepanov\\_65@mail.ru](mailto:ilya_stepanov_65@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, вед. науч. с., докт. геол.-минер. н.; Геологический институт РАН, вед. науч. с.; *e-mail:* [kazansky\\_alex@mail.ru](mailto:kazansky_alex@mail.ru)

<sup>3</sup> Ярославский государственный педагогический университет имени К.Д. Ушинского, кафедра географии, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* [dnkiselev@mail.ru](mailto:dnkiselev@mail.ru)

<sup>4</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра геофизики и геоинформационных технологий, мл. науч. с.; *e-mail:* [lina.kosareva@mail.ru](mailto:lina.kosareva@mail.ru)

<sup>5</sup> Геологический институт РАН, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* [russianjurassic@gmail.com](mailto:russianjurassic@gmail.com)

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, вед. науч. с., докт. геол.-минер. н.; Геологический институт РАН, вед. науч. с.; *e-mail:* [ostracon@rambler.ru](mailto:ostracon@rambler.ru)

<sup>7</sup> Геологический институт РАН, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* [shepetova.map@gmail.com](mailto:shepetova.map@gmail.com)

<sup>8</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, кафедра биологической эволюции, аспирант; *e-mail:* [shurupova.ya@yandex.ru](mailto:shurupova.ya@yandex.ru)

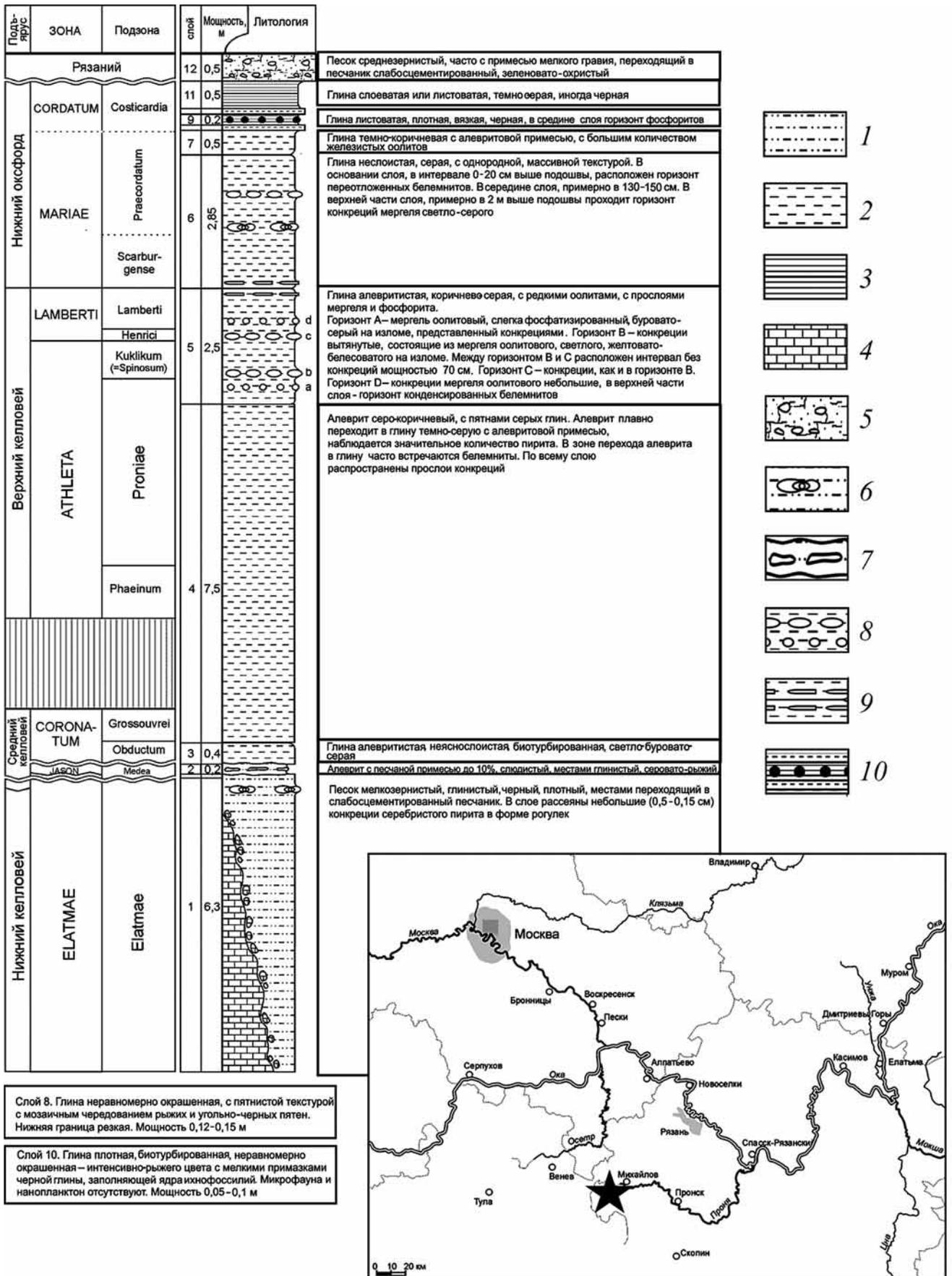


Рис. 1. Географическое положение опорного разреза Михайловцемент (показано звездочкой), литологическая колонка и био-стратиграфическое расчленение разреза по аммонитам: 1 – алеврит, 2 – аргиллит, 3 – глина, 4 – известняк, 5 – сулинок, 6 – гнезда аммонитов, 7 – стяжения песчаника, 8 – конкреции мергеля, 9 – прослои белемнитов, 10 – фосфоритовые конкреции

резов для келловейских и нижнеоксфордских отложений Московской синеклизы. В опорном разрезе Михайловцемент отложения нижнего келловей и низов среднего келловей представлены фрагментарно, но верхняя часть среднего келловей и верхний келловей содержат наиболее биостратиграфически полную для Русской плиты последовательность аммонитов [Киселев, 1999]. Эти отложения насыщены микро- и макрофоссилиями, детально расчленены по остракодам, фораминиферам и известковому нанопланктону [Тесакова и др., 2017], а по остракодам выполнены комплексные палеоэкологические реконструкции [Tesakova, Shurupova, 2018].

Карьер Михайловцемент вскрывает известняки каменноугольного возраста, на которых несогласно залегают келловейские—оксфордские породы, перекрытые маломощным прослоем песков с фосфоритами рязанского возраста. Юрская часть разреза представлена песками, алевролитами и глинами и подразделяется на 11 слоев. Краткое описание разреза и его расчленение по аммонитам приведены на рис. 1, б. В мае 2017 г. М.А. Роговым и Д.Н. Киселевым из келловейских и нижнеоксфордских отложений (слои 1–6) отобрано 116 неориентированных образцов; ими же выполнено расчленение разреза по аммонитам и его описание. Общая мощность опробованных отложений составила 18,4 м, за исключением небольшого интервала вблизи границы среднего и верхнего келловей, закрытого осыпью. Шаг отбора из отложений нижнего оксфорда варьировал от 20 до 70 см, из келловейского интервала — от 5 до 40 см (рис. 1, б). Литологический анализ шлифов из тех же образцов и соответствующая модель выполнены Е.В. Щепетовой. Из проб, взятых М.А. Роговым в том же карьере в 2005 г., проанализировано 29 комплексов остракод и реконструированы палеоусловия [Tesakova, Shurupova, 2018].

**Коэрцитивная спектрометрия.** Все образцы были изучены методом коэрцитивной спектрометрии в Институте геологии и нефтегазовых технологий КФУ (г. Казань) на коэрцитивном спектрометре «J\_meter» конструкции П.Г. Ясонова [Буров и др. 1986; Jasonov et al., 1998], позволяющем одновременно измерять параметры индуктивного и остаточного намагничивания/размагничивания образцов в поле до 1,5 Тл. По кривым нормального остаточного намагничивания и перемагничивания определены следующие петромагнитные параметры: намагниченность насыщения ( $J_s$ ), остаточная намагниченность насыщения ( $J_{rs}$ ), коэрцитивная сила ( $B_c$ ), остаточная коэрцитивная сила ( $B_{cr}$ ) и величина начальной намагниченности ( $\chi_{int}$ ). В соответствии с методикой [Kosareva et al., 2015] для всех образцов определены вклад парамагнитной составляющей в общий сигнал по индуктивной кривой нормального намагничивания и вклад ферромагнитной и суперпарамагнитной составля-

ющих. На этом основании внесены соответствующие поправки в значения параметров  $J_s$  и  $B_s$  и определены ферромагнитная ( $\chi_{fer}$ ) и парамагнитная ( $\chi_{par}$ ) составляющие магнитной восприимчивости. Дополнительно рассчитывались величина магнито жесткой составляющей остаточной намагниченности насыщения (hard isothermal remanent magnetization)  $HIRM = (J_{rs(700 \text{ мТл})} - J_{rs(-300 \text{ мТл})})/2$  и соотношение между магнито жесткими и магнитомягкими минералами  $S = -J_{rs(-30 \text{ мТл})}/J_{rs(700 \text{ мТл})}$ .

Чтобы определить составляющие ферромагнитной фракции для всех образцов проведен компонентный анализ по спектрам нормального намагничивания методами непрерывного вейвлет-преобразования вейвлетом, построенным на основе гауссиана (МНАТ) [Косарева и др., 2015]. Диагностика компонентов разложения с разными положениями максимума коэрцитивного спектра (ПМКС) проводилось в соответствии с работой [Egli, 2003]. Были диагностированы следующие компоненты: терригенная D+EX (detrital magnetite + extracellular magnetite) с интервалом ПМКС в интервале 0–20 мТл; «мягкая» биогенная BS (biogenic soft) с интервалом ПМКС 30–65 мТл; «жесткая» биогенная BH (biogenic high) с интервалом ПМКС 65–95 мТл и «жесткая» H (high) с ПМКС >100 мТл. Компонента H в разрезе Михайловцемент имеет чрезвычайно широкую дисперсию, что позволяет разделить ее на две составляющие. Составляющая HH (high hematite) с ПМКС в пределах 100–650 мТл, вероятно, связана с гематитом. У составляющей HG (high goethite) ПМКС превышает 650 мТл, что определяется наличием высококоэрцитивного минерала гётита (?). Такое разделение подтверждается диапазонами параметра S: как правило, у образцов, содержащих гётит,  $S < 0$  [Liu et al., 2007], а у образцов, содержащих гематит,  $S > 0$ . Гистограммы распределения ПМКС нормального остаточного намагничивания для различных компонент показаны на рис. 2.

**Термомагнитный анализ,** использованный для диагностики магнитных минералов по значениям температуры Кюри и фазовым переходам, проводился в дифференциальной модификации (ДТМА) по индуцированной намагниченности ( $J_i$ ) на авторегистрирующих крутильных магнитных весах, действующих по нулевому методу [Буров, Ясонов, 1979]. Скорость нагрева составляла 100 °С/мин. Для 26 образцов получены по две диаграммы последовательного нагрева до 800 °С в поле 0,2 Тл.

**Термокаппметрия.** Для диагностики пирита и сидерита, трансформирующихся в магнетит при нагреве свыше 400 °С [Буров, Ясонов, 1979], выполнены два последовательных измерения величины магнитной восприимчивости образцов на каппабридже МФК-1 до и после его нагрева до 500 °С в течение часа. Разница между двумя измерениями — «термокаппа» ( $d\chi$ ) отражает содержание новообразованного магнетита в образце

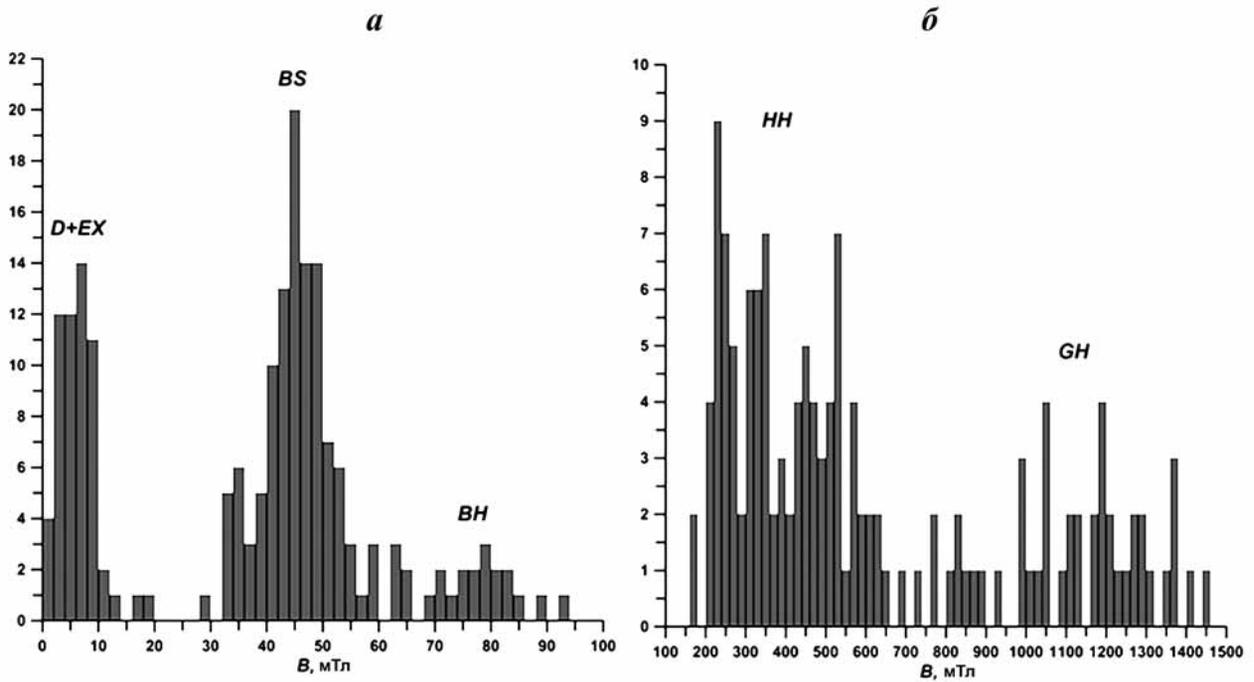


Рис. 2. Определение ферромагнитных компонент: гистограмма распределения ПМКС нормального остаточного намагничивания для полей 0–100 мТл (а) и гистограмма распределения ПМКС нормального остаточного намагничивания для полей 100–1500 мТл (б)

[Пименов и др., 2009]. Термокаппаметрический анализ выполнен для 108 образцов в лаборатории петрофизики СГУ (г. Саратов).

**Результаты исследований и их обсуждение.**

**Скалярные магнитные характеристики.** Поведение наиболее информативных скалярных магнитных характеристик приведено на рис. 3. Разрез хорошо дифференцируется по распределению петромагнитных параметров, что позволяет выделить в нем 7 петромагнитных интервалов, отвечающих разным этапам развития бассейна.

**Интервал 1** охватывает нижнюю часть слоя 1 (16,2–18,4 м) и характеризуется самым высоким содержанием ферромагнитной фракции ( $\chi_{fer}$ ) и высоким (60–80% от величины  $\chi_{int}$ ) содержанием парамагнитной ( $\chi_{par}$ ). Значительная часть намагниченности  $Jrs$  связана с магнитожесткими минералами (HIRM до 40% от  $Jrs$ ) и, соответственно, демонстрирует повышенную магнитную жесткость (высокие значения  $V_{sg}$  и низкие  $S$ ). ДТМА показал присутствие магнетита, грейгита, гематита и гётита, пирит и сидерит не встречены.

**Интервал 2** составляет верхнюю часть слоя 1 (16,2–13,8 м). Здесь уменьшаются величины  $\chi_{fer}$  и  $\chi_{par}$ , исчезают магнитожесткие минералы (HIRM ~10%) и, соответственно, уменьшается магнитная жесткость. По данным ДТМА здесь присутствуют грейгит и в меньшей степени пирит и гематит.

**Интервал 3** отвечает слоям 2, 3 и нижней части слоя 4 (13,8–12,3 м). В этом интервале увеличивается концентрация парамагнитных (повышение значений  $\chi_{par}$ ) и магнитожестких минералов

(увеличение HIRM) и, соответственно, магнитная жесткость. По данным ДТМА присутствуют магнетит, грейгит, гётит и в меньшем количестве гематит.

**Интервал 4** соответствует средней части слоя 4 (7,3–6,8 м). Здесь величины  $\chi_{fer}$  и  $\chi_{par}$  сохраняются такими же, как в интервале 3, тогда как количество магнитожестких минералов резко уменьшается (HIRM ~ 10÷12% от  $Jrs$ ) и, соответственно, снижаются значения  $V_{sg}$  и возрастают  $S$ . При этом вариации всех параметров минимальные. Исключение представляет параметр  $d\chi$ , значения которого возрастают вверх по разрезу, что свидетельствует о росте концентрации пирита в осадках. По данным ДТМА в осадках присутствует грейгит, пирит и, возможно, гематит.

**Интервал 5** охватывает верхнюю часть слоя 4 (6,8–5,5 м). Здесь вверх по разрезу постепенно увеличиваются значения всех петромагнитных параметров, лишь содержание пирита, согласно  $d\chi$ , сохраняется относительно постоянным. ДТМА фиксирует присутствие гетита, пирита и, возможно, сидерита.

**Интервал 6** отвечает слою 5 и самым нижним горизонтам слоя 6 с прослоями белемнитов (5,5–2,7 м). Это сложнопостроенная последовательность с самыми резкими колебаниями магнитных параметров за счет изменения содержания ферромагнитной фракции, что обусловлено концентрацией магнитожестких минералов (HIRM до 80%  $Jrs$ ,  $V_{sg}>350$  мТл;  $S<0$ ), и парамагнитной фракции за счет высокой концентрации пирита и сидерита

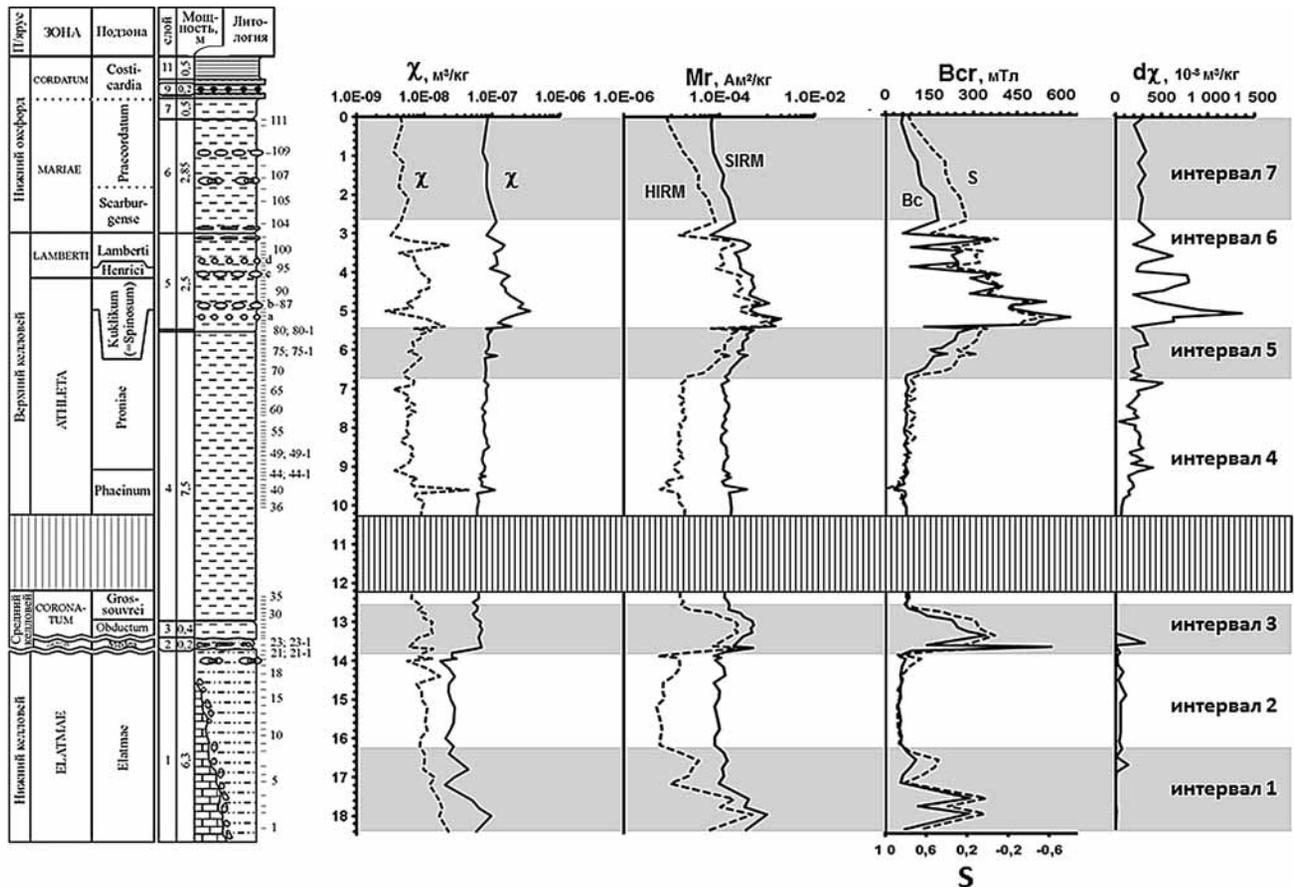


Рис. 3. Изменение скалярных петромагнитных параметров по разрезу. Условные обозначения см. на рис. 1

( $d\chi > 600 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг). ДТМА здесь зафиксировал только наличие пирита и сидерита, поскольку остальные магнитные минералы маскируются из-за массового образования вторичного магнетита при температуре свыше 400 °С.

*Интервал 7* охватывает большую часть слоя б (2,7–0 м). Значения петромагнитных параметров здесь постепенно уменьшаются ( $S$  — увеличивается) до значений, типичных для интервала 4. По данным ДТМА зафиксировано только присутствие пирита.

**Козрцитивная спектроскопия.** Совместный анализ результатов термомагнитного анализа и коэрцитивной спектроскопии позволил установить соответствие между компонентами с определенными ПМКС и ферромагнитными минералами. Предполагается, что компонента D+EX связана с крупнозернистым детритовым магнетитом, BS — с более мелкозернистым биогенным магнетитом; BH — с биогенным грейгитом, NH — с гематитом и HG с гётитом. Распределение ПМКС компонент по разрезу и относительный вклад каждой из них в общую намагниченность представлены на рис. 4.

Очевидно, что основу магнитной фракции в разрезе составляют биогенные минералы — грейгит (BH) и в меньшей степени магнетит (BS), что свидетельствует о преимущественно биогенном характере формирования магнитной фракции.

Концентрация грейгита и магнетита меняется в противофазе (рис. 4), вероятно, они продуцировались разными видами магнитотактических бактерий, имеющих разные экологические ниши. Смена «грейгитовых» и «магнетитовых» горизонтов по разрезу отвечает изменениям водной среды. Концентрация терригенного магнетита (D+EX) незначительна. Он присутствует в основном в интервалах с преобладанием биогенной составляющей, в интервалах с высоким содержанием гётита (HG) отсутствует. Гётит, определяющий высокую магнитную жесткость отложений, вероятно, формировался в регрессивных условиях, поскольку его концентрация резко возрастает за счет редукции биогенного и терригенного компонентов. В трансгрессивных интервалах наблюдается обратная зависимость — гематит (NH) в магнитной жесткости имеет второстепенное значение, его влияние ощущается только в интервале 7. Вклад гематита слабо коррелирует с изменениями остальных компонентов и, вероятно, связан не с колебаниями уровня моря, а с содержанием кислорода в среде.

**Сравнение и синтез петромагнитных, седиментологических и палеобиологических данных.** Седиментологические построения для разреза Михайловцемент базируются на полевых наблюдениях и изучении петрографических шлифов. Для палеорекоstructions использованы данные

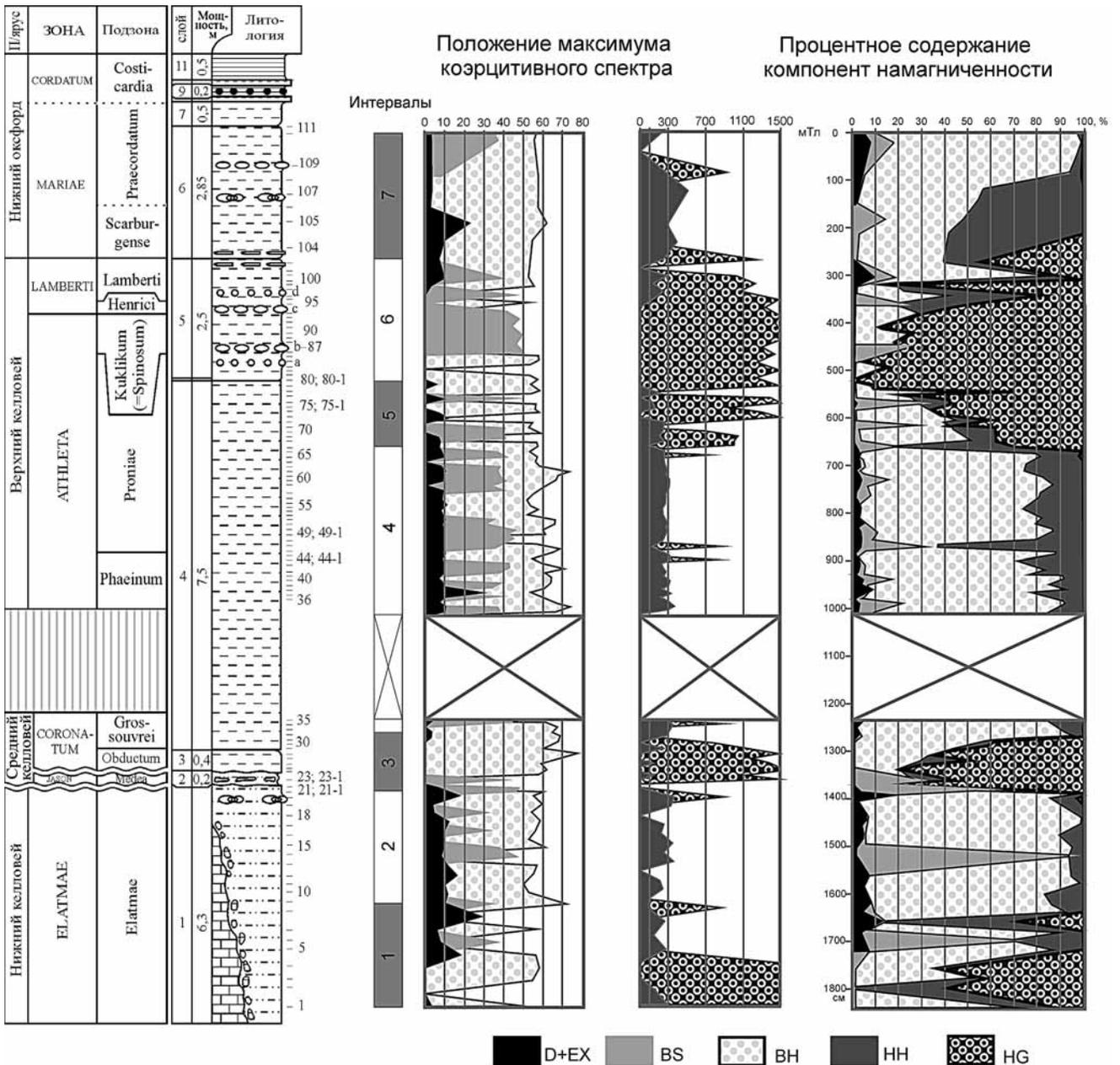


Рис. 4. Изменения по разрезу ПМКС нормального остаточного намагничивания (слева) и процентный вклад каждой ферромагнитной компоненты в общую  $J_{rs}$  (справа)

распределения аммонитов. Остракодовый анализ позволил оценить условия в палеобассейне, начиная с зоны Coronatum [Tesakova, Shuripova, 2018]. Синтез данных позволил реконструировать следующую историю его развития. Описание интервалов начинается с их седиментологической характеристики.

**Интервал 1.** Отложения накапливались в морской обстановке с нормальной соленостью, что установлено по многочисленным находкам аммонитов и белемнитов. Песчаные отложения, отвечающие этому интервалу, формировались в гидродинамически активных и крайне мелководных условиях. Такая обстановка подтверждается присутствием биогенных грейгита и магнетита, а трансгрессивный характер циклита фиксируется

по смене гематита и гётита в нижней части этого интервала на терригенный магнетит в верхней части интервала (рис. 4, 5).

**Интервал 2** соответствует преимущественно гидродинамически активной переходной обстановке от предфронтальной зоны пляжа (выше уровня обычных волн на глубине 2–20 м, в среднем 8–10 м [Рейнек, Сингх 1981]) к зоне шельфа (ниже глубины штормового базиса — 8–30 м, в среднем 10–15 м [Рейнек, Сингх, 1981]). Подобная обстановка иногда относится к внутренней зоне шельфа. Нормальная соленость палеобассейна подтверждается находками головоногих моллюсков, а в аналогах этого интервала — остатками фораминифер и нанопланктона [Тесакова и др., 2017]. Здесь преобладает биогенный грейгит, реже

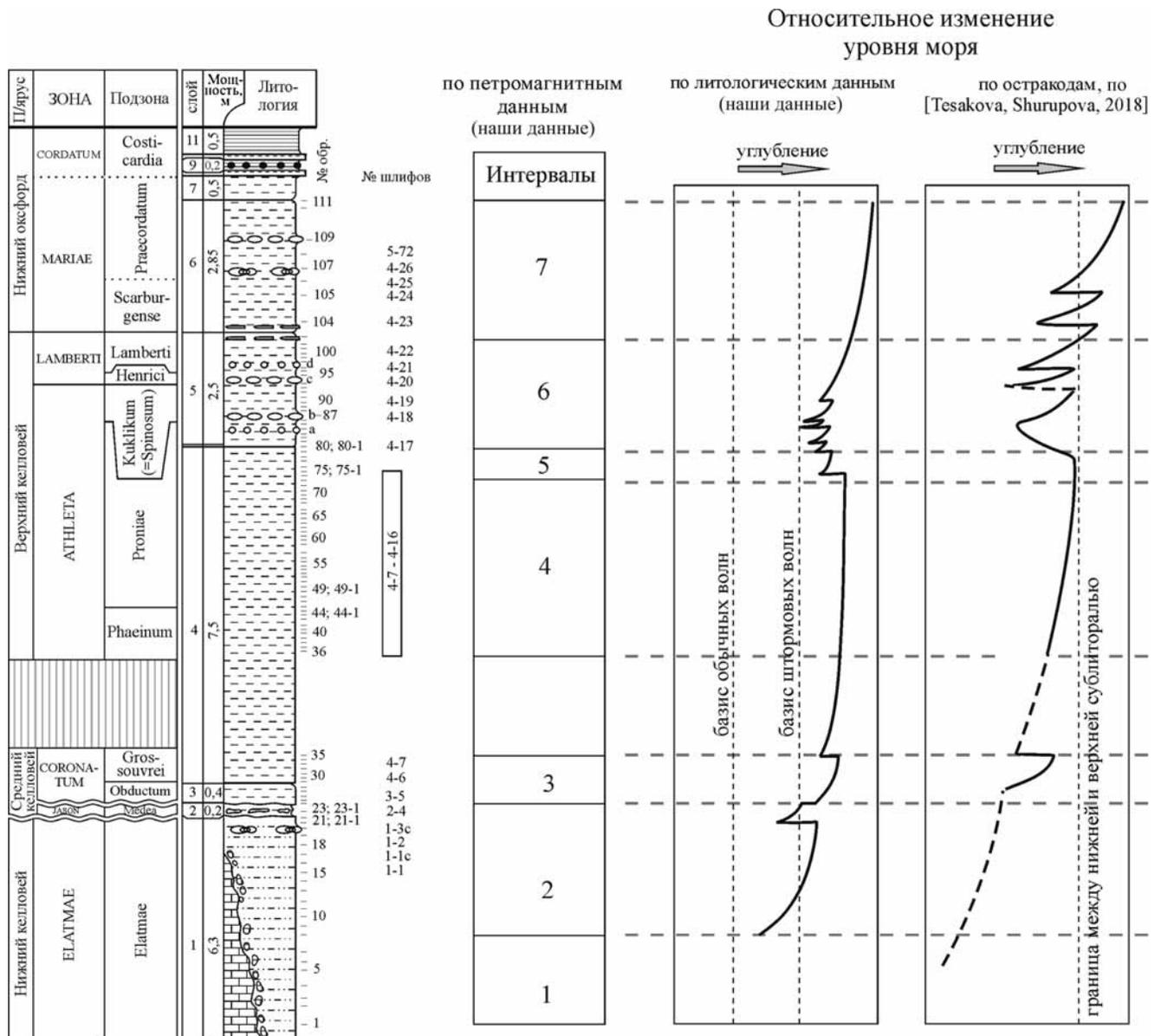


Рис. 5. Палеоэкологические реконструкции по петромагнитным, литологическим и палеонтологическим данным

магнетит, присутствие гематита в нижней части интервала свидетельствует о преимущественно кислородной обстановке в придонных слоях воды. Появление терригенного магнетита указывает на активизацию сноса обломочного материала с континента, а появление пирита — на первоначальное присутствие в осадках органического вещества (ОВ) и локальное развитие в осадке восстановительных обстановок.

**Интервал 3.** По заметному увеличению доли алевритовой фракции в глинистых отложениях в основании этого интервала фиксируются относительно слабый регрессивный тренд (по сравнению с верхней частью предыдущего интервала) и начало нового трансгрессивного цикла, что отражено в постепенном увеличении содержания глинистого материала, мелкого известкового биогенного детрита, возрастании доли остатков иглокожих и раковин бентосных фораминифер.

Аналогичная модель реконструируется по отсутствию в нижней части среднекелловейской зоны Coronatum (фаза Obductum) не только остатков остракод, но также фораминифер и нанопланктона; предполагается более низкое стояние моря по сравнению с фазами Medea и Elatmae среднего и раннего келловей. Это хорошо согласуется с преобладанием здесь гётита (за счет сокращения количества биогенного грейгита) и отсутствием терригенного магнетита. В то же время такому предположению противоречит присутствие здесь достаточно многочисленных и разнообразных аммонитов. Выше, в подзоне Grossouvrei зоны Coronatum, зафиксировано первое появление комплексов остракод, распространенных далее вверх по всему разрезу (совместно с фораминиферами и нанопланктоном), что свидетельствует о повышении уровня моря. Здесь же исчезает гётит, появляется терригенный магнетит и растет содержа-

ние биогенного грейгита. По результатам анализа размерных кластеров остракод в фазе Grossouvrei существовали значения глубины, характерные для верхней сублиторали и постепенно нарастающие к концу этого интервала (но только в пределах этой биономической зоны!).

*Интервал 4.* Для него реконструируется стабильная обстановка «внешнего» шельфа, находившегося ниже базиса штормовых волн, но недалеко (в зоне действия генерированных штормами течений). Это устанавливается по присутствию в глинистых отложениях дискретных тонких прослоев с мелкими литокластами крупночешуйчатых зеленоватых глин, более характерных для нижележащих интервалов и, вероятно, заносившихся из соседних более близких к берегу фациальных обстановок. Возможен слабый регрессивный тренд, переходящий в слабый трансгрессивный, а затем стабильно высокое положение уровня моря. По остракодам тоже реконструирован трансгрессивно-регрессивный (Т/Р) цикл с наиболее полно сохранившейся в разрезе трансгрессивной фазой и вариациями глубины, не выходящей за пределы верхней сублиторали. Углубление бассейна подтверждается отсутствием гётита в отложениях, постоянным присутствием терригенного магнетита и гематита, поступавших в составе взвешенной глинистой мути, а также высоким содержанием биогенного грейгита. Увеличение содержания тонкодисперсного пирита свидетельствует о слабой аэрации придонных слоев морской воды и более высоком первоначальном содержании реакционноспособного органического вещества (ОВ) в осадках по сравнению с интервалом 4.

*Интервал 5* — сохраняется обстановка «внешнего» шельфа, однако в исследуемую часть бассейна начинают поступать железистые оолиты, что обуславливает постепенное увеличение концентрации гётита. Об аллотигенном происхождении оолитов свидетельствует ассоциация этих образований с окатанными кварцевыми зёрнами и детритом иглокожих сходной размерности, что, вероятно, отражает относительно слабоамплитудную регрессию, сместившую область седиментации ближе к базису штормовых волн — в зону действия течений, генерированных штормами. Палеонтологические данные свидетельствуют о высоком стоянии уровня моря в этом интервале все еще в пределах верхней сублиторали. Регрессия отмечается по росту концентрации гётита, появлению сидерита и сокращению как биогенной, так и терригенной составляющих магнитной фракции.

*Интервал 6.* Обстановка «внешнего» шельфа постепенно смещается ближе к базису штормовых волн. В целом седиментация была прерывистой — периоды поступления терригенного материала и материала из соседних более мелководных фациальных зон сменялись периодами замедленной седиментации и сопровождалась конденсацией

осадков (формирование конкреционных горизонтов оолитовых мергелей), вследствие этого, возможно, разрез этого интервала сокращен. Здесь распознается 3 Т/Р циклита. По остракодам также реконструируются 3 Т/Р циклита. По петромагнитным данным регрессивные части циклитов фиксируются по резкому увеличению содержания гётита за счет сокращения биогенных грейгита и магнетита, а также концентрации пирита и сидерита. В трансгрессивных интервалах, напротив, возрастает концентрация биогенных минералов, снижается количество сидерита и появляется терригенный магнетит.

*Интервал 7.* Для этого интервала продолжается трансгрессивный тренд, начавшийся в конце предыдущего интервала, что подтверждается и остракодовым анализом. Последний выявил внутри трансгрессии два отдельных события, маркирующих нижнюю сублитораль. По петромагнитным данным хорошо фиксируются только нижний Т/Р этап в нижней части интервала и последующая крупная трансгрессия в его верхней части. В регрессивных интервалах преобладает гётит, в трансгрессивных — биогенный грейгит и магнетит, появляется терригенный магнетит, количество гематита сокращается вверх по разрезу.

**Заключение.** Исследования показывают, что реконструкции условий осадконакопления, выполненные по петромагнитным данным, согласуются с аналогичными реконструкциями, основанными на литолого-минералогических и микрофаунистических материалах. Представленные кривые колебаний уровня моря, независимо построенные нами по данным трех разных методов, дополняют одна другую и не имеют принципиальных противоречий. Их тренды совпадают с эвстатическими кривыми, ранее построенными для Русской плиты на основе макрофаунистического, литологического и палеофациального анализов [Sahagian et al., 1996] и по остракодам [Тесакова, 2014], а также хорошо соотносятся с глобальными кривыми изменений уровня моря [Hallam, 2001; Наг, 2017]. Постоянный подъем моря с начала оксфорда фиксируется на всех обсуждаемых кривых (по нашим данным и данным указанных авторов).

Таким образом, келловейские трансгрессивно-регрессивные события на Русской плите в целом демонстрируют слабый трансгрессивный тренд, что совпадает с реконструкциями, предложенными ранее для рассматриваемого региона [Sahagian et al., 1996; Тесакова, 2014], но противоречит общему регрессивному тренду на кривой Б. Хака [Наг, 2017].

Дополнительное преимущество петромагнитных построений заключается в количественных оценках биопродуктивности бассейна по биогенной компоненте намагниченности и сноса осадочного материала с суши по терригенной компоненте.

**Благодарности.** Авторы искренне признательны анонимному рецензенту, благодаря которому статья приведена к настоящему виду.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках тем госзадания ГИН (№ 0135-2018-0029, 0135-2018-

0035, 0135-2018-0051 и 0135-2018-0036), МГУ имени М.В. Ломоносова (№ АААА-А16-116021660031-5 и АААА-А16-116033010096-8) и при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-00501).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Барбошкин Е.Ю., Гужиков А.Ю., Беньямовский В.Н.* и др. Новые данные о стратиграфии и условиях формирования эоценовых отложений на плато Актологай (Западный Казахстан) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 2. С. 67–76.

*Буров Б.В., Нургалеев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во КГУ, 1986. 165 с.

*Буров Б.В., Ясонов П.Г.* Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во КГУ, 1979. 160 с.

*Гужиков А.Ю.* Геологическая информативность магнетизма керн и шлама осадочных пород, полученных при бурении разведочных скважин // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. № 4(46). С. 51–61.

*Киселев Д.Н.* Зональные и подзональные аммонитовые комплексы среднего келловоя центральной России // Проблемы стратиграфии и палеонтологии мезозоя: Научные чтения, посвященные М.С. Месежникову. СПб., 1999. С. 87–115.

*Косарева Л.Р., Утемов Э.В., Нургалеев Д.К.* и др. Разделение ферромагнитных компонент на основе анализа петель гистерезиса остаточной намагниченности // Физика Земли. 2015. № 5. С. 80–99.

*Пименов М.В., Глинских Л.А., Гужиков А.Ю.* и др. О возможном отражении палеоэкологических условий в петромагнетизме келловейско-оксфордских отложений разреза Дубки (г. Саратов) // Изв. Саратовского ун-та. Сер. Науки о Земле. 2009. Т. 9, вып. 1. С. 70–75.

*Рейнек Г.-Э., Сингх И.Б.* Обстановки терригенного осадконакопления (с рассмотрением терригенных кластических осадков). М.: Недра, 1981. 439 с.

*Тесакова Е.М.* Юрские остракоды Русской плиты: стратиграфическое значение, палеоэкология и палеогеография: Автореф. докт. дисс. М., 2014. 48 с.

*Тесакова Е.М., Шурупова Я.А., Устинова М.А.* Стратиграфия келловоя и нижнего оксфорда разреза

Михайловцемент (Рязанская обл.) по микрофауне и нанопланктону. М.: Наука, 2017. (Тр. ГИН РАН; Вып. 615). С. 264–300.

*Egli R.* Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves // J. Geophys. Res. B: Solid Earth. 2003. Vol. 108, N 2. P. EPM 4-1–4-25.

*Evans M.E., Heller F.* Environmental magnetism. N.Y.: Academic Press, 2003. 299 p.

*Hallam A.* A review of the broad pattern of Jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge // Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol. 2001. Vol. 167, N 1–2. P. 23–37.

*Haq B.* Jurassic Sea-Level Variations: A Reappraisal // GSA Today. 2017. Vol. 28, N 1. doi:10.1130/GSATG359A.1.

*Jassonov P.G., Nourgaliev D.K., Bourov B.V.* et al. A modernized coercivity spectrometer // Geol. Carpathica. 1998. Vol. 49, N 3. P. 224–226.

*Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M.* et al. Ferromagnetic, dia/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for environmental reconstruction // ARPN J. Earth Sci. 2015. Vol. 4, N 1. P. 1–6.

*Liu Q-S., Roberts A.P., Torrent J.* et al. What do the HIRM and S-ratio really measure in environmental magnetism? // Geochem., Geophys., Geosystems. 2007. Vol. 8, Q09011. 145 p.

*Sahagian D., Pinous O., Olfieriev A., Zakharov V.* Eustatic curve for the Middle Jurassic-Cretaceous based on Russian platform and Siberian stratigraphy: zonal resolution // Bull. AAPG. 1996. Vol. 80. P. 1433–1458.

*Tesakova E.M., Shurupova Ya.A.* Ostracod Analysis of Callovian and Lower Oxfordian Deposits of the Mikhailovtsement Section (Ryazan Region): Methods and Results // Paleontol. J. 2018. Vol. 52, N 13. P. 1547–1568.

Поступила в редакцию 25.10.2018

Поступила с доработки

Принята к публикации

УДК 553.983

А.С. Рослякова<sup>1</sup>, А.Г. Калмыков<sup>2</sup>, Г.А. Калмыков<sup>3</sup>, Р.А. Хамидуллин<sup>4</sup>,  
Н.И. Коробова<sup>5</sup>, О.М. Макарова<sup>6</sup>, Е.В. Козлова<sup>7</sup>

## СТРОЕНИЕ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КОЛЛЕКТОРСКИХ ИНТЕРВАЛОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПРИОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Представлены результаты изучения строения и фильтрационно-емкостных свойств пород баженовской свиты в разрезах трех скважин, расположенных в разных структурных зонах Приобского месторождения. Показано, что пористость образцов варьирует от 0,02 до 6,95%, абсолютная газопроницаемость пород достигает 1,364 мД. Установлено, что коллекторы в баженовской свите приурочены к силицит-радиоляритам (обладают пористостью, связанной с выщелачиванием раковинок радиолярий) и керогеново-глинисто-кремнистой породе и керогеново-глинистым силицитам (пористость связана с освобождением пространства между глинисто-кремнистой матрицей и керогеном за счет дозревания органического вещества). На формирование пустотного пространства в этих группах литотипов оказывали влияние вторичные процессы — перекристаллизация радиолярий и локальный прогрев.

*Ключевые слова:* баженовская свита, нетрадиционные коллекторы нефти, фильтрационно-емкостные свойства, строение порового пространства.

The paper presents a study of the structure and reservoir properties of rocks of the Bazhenov formation in the sections of three wells located in different structural zones of the Priobskoye field. It is shown that the porosity of the samples varies from 0.02% to 6.95%, the absolute gas permeability of the rocks reaches 1.364 mD. It is established that the collectors in the Bazhenov formation are confined to silicite-radiolarites (possessing porosity associated with the leaching of radiolarian shells) and kerogen-clay-siliceous rock and kerogen-clay silicite (porosity is associated with the release of space between the clay-siliceous matrix and kerogen by ripening organic matter). The following secondary processes influenced the formation of voids in these lithotypes: recrystallization of radiolarians and local warming up.

*Key words:* Bazhenov formation, unconventional oil reservoirs, reservoir properties, pore volume structure.

**Введение.** В настоящее время доля нетрадиционных ресурсов в общем количестве ресурсов Российской Федерации стремительно увеличивается в связи с истощением традиционных ресурсов. Баженовская свита (БС) представляет собой один из перспективных источников сланцевой нефти и газа на территории нашей страны, но ее строение до сих пор полностью не изучено, скважины, имеющие промышленные притоки нефти из баженовской свиты, чередуются с «сухими» скважинами [Калмыков, 2017], поэтому вопрос изучения строения баженовской свиты и ее пустотного пространства стоит особенно остро.

Ранее исследователями было показано, что структурное положение существенно влияет на пористые характеристики и коллекторские свойства пород БС [Алексеев и др., 2009; Балущкина и др., 2013]. Статья посвящена исследованию пород баженовской свиты в трех скважинах на территории Приобского месторождения (ХМАО, Тюменская область), расположенных в разных структурных зонах: скважины А и В, согласно структурной карте по кровле баженовской свиты, находятся на разной глубине во впадинах, тогда как скважина С пробурена выше по изогипсам, на склоновой части поднятия, расположенного

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* rosliakova.anastasiia@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, докт. геол.-минер. н; *e-mail:* gera64@mail.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail:* ruslan\_msu@mail.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ассистент; *e-mail:* nataliya.korobova54@mail.ru

<sup>6</sup> ЗАО МиМГО, геолог; *e-mail:* ok.hrust@yandex.ru

<sup>7</sup> Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов, ст. науч. с.; *e-mail:* e.kozlova@skoltech.ru

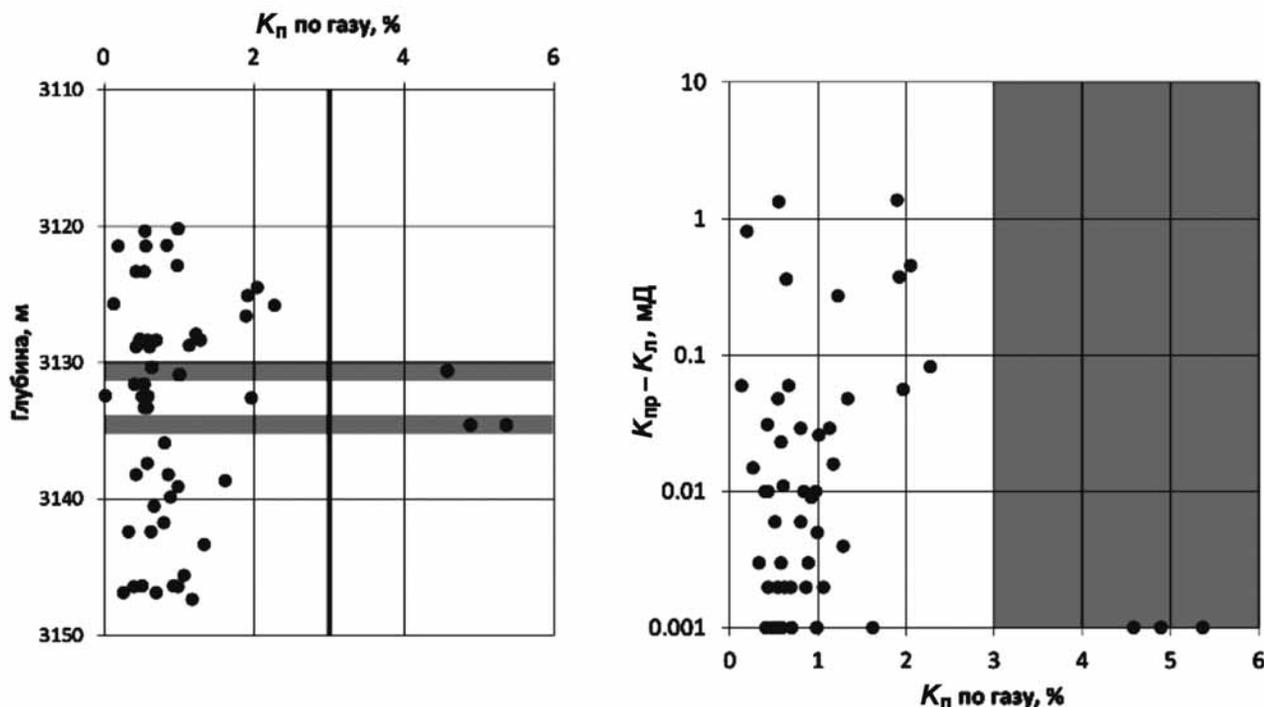


Рис. 1. Фильтрационно-емкостные свойства скважины А: а — распределение открытой пористости по газу ( $K_p$  по газу) по разрезу (серое — интервалы с  $K_p$  по газу >3%); б — сопоставление открытой пористости по газу с абсолютной газопроницаемостью с поправкой по Клинкенбергу ( $K_{пр}-K_{л}$ )

западнее от нее. Интерес представляет изучение изменения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) и литологического состава по площади месторождения, прослеживание возможной связи между ними, оценка влияния структурных особенностей и вторичных процессов на формирование коллекторских свойств.

Выделение коллекторских интервалов проводилось на основании результатов определения ФЕС. В результате предыдущих исследований к коллекторам в баженовской свите отнесены породы, пористость образцов которых по газу превышает 3% [Калмыков, 2017]. Такое значение пористости выбрано на основании данных о притоках, полученных из скважин с разрезами баженовской свиты с разной пористостью [Калмыков, 2017] и с учетом возможной погрешности полученного результата, вызванной неоднородностью пород баженовской свиты. Важно отметить, что пустотное пространство, через которое в лабораторных условиях может быть прокачан газ, в пласте заполнялось нефтью, однако при подъеме колонки керна на поверхность нефть из пород выдавливалась за счет изменения давления и дегазации пород. По фильтрационным свойствам можно выделить естественные коллекторы, которых проницаемость с поправкой по Клинкенбергу составляет  $>0,004$  мД, и технически стимулируемые коллекторы с проницаемостью  $<0,004$  мД [Калмыков, 2017].

**Методика исследования.** Для выделения наиболее перспективных интервалов разрезов скважин

использованы результаты лабораторных петрофизических исследований на стандартных цилиндрических образцах горных пород длиной и диаметром 30 мм, отобранных из керна скважин А, В и С. В ходе исследования фильтрационно-емкостные свойства образцов определены с использованием специального оборудования — автоматизированной системы измерения пористости и проницаемости — порозиметра «АР-608» («CoretestSystems», США). Измерение динамической пористости выполнено газовольметрическим методом, основанным на законе Бойля–Мариотта. Далее под понятием пористость будем иметь в виду именно динамическую пористость. Исследование значений абсолютной газопроницаемости проводилось по методу нестационарной газофильтрации азотом. При характеристике фильтрационных свойств образцов проницаемость бралась с поправкой по Клинкенбергу, учитывающей проскальзывание газа при низких значениях давления. В низкопроницаемых породах эта поправка показывает истинное значение проницаемости, так как без учета проскальзывания газа замеры проницаемости имеют существенную погрешность. Отметим, что порозиметр за возможное минимальное значение проницаемости с поправкой по Клинкенбергу принимает  $<0,001$  мД. В нашей работе столь малые значения проницаемости были округлены до 0 мД.

Помимо изучения фильтрационно-емкостных свойств определяли литологический состав баженовской свиты и геохимические параметры.

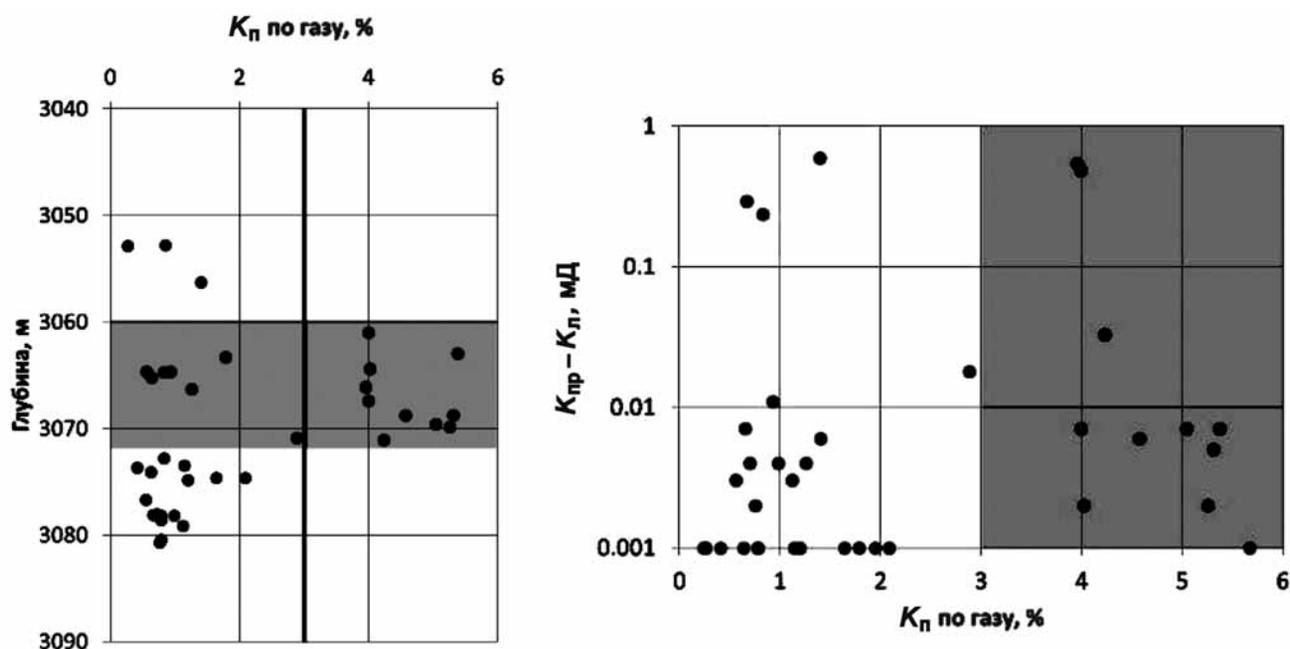


Рис. 2. Фильтрационно-емкостные свойства скважины В: а — распределение открытой пористости по газу ( $K_{п}$  по газу) по разрезу (серое — интервалы с  $K_{п}$  по газу >3%); б — сопоставление открытой пористости по газу с абсолютной газопроницаемостью с поправкой по Клинкенбергу ( $K_{пр}$ -Кл)

По описанию керна и шлифов, минерально-компонентному составу (по массе и по объему), ГИС и геохимическим исследованиям БС выполнена разбивка отложений скважин на группы литотипов. Для определения минерально-компонентного состава применяли рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализы. Первый основан на получении и анализе дифракционной картины, возникающей в результате интерференции рентгеновских лучей, рассеянных электронами атомов облучаемого объекта; второй — на зависимости между интенсивностью излучения рентгеновской характеристической флуоресценции определяемого элемента и содержанием этого элемента в анализируемой пробе. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновских дифрактометрах «Thermo ARL X-TRA», «Дрон-4», «JEOL». Рентгенофлуоресцентный анализ выполняли на вакуумном спектрометре последовательного действия модели «Axios Advanced». В качестве источника рентгеновского излучения в спектрометре используется рентгеновская трубка ( $U_{max}=66$  кВ,  $I_{max}=160$  мА; материал анода в базовом исполнении — родий). Для характеристики типа органического вещества (ОВ) и особенностей его катагенетического преобразования использовался пиролизатор Rock-Eval-6; принцип действия которого основан на ступенчатом нагреве образцов горной породы в инертной среде и фиксации углеродсодержащих соединений пламенно-ионизационным и инфракрасным детекторами [Козлова, 2015].

**Значения ФЕС.** В изученных образцах отсутствует корреляционная зависимость между значениями пористости и проницаемости, полученные значения представлены на рис. 1–3.

Открытая пористость по газу в скважине А изменяется от 0,02% (3132,44 м) до 5,37% (3134,55 м) (рис. 1, а). Абсолютная газопроницаемость варьирует от 0 до 1,364 мД (3126,60 м). Значения открытой пористости, позволяющие отнести исследуемые прослой к коллектору, наблюдаются на глубине 3134,55 и 3130,6 м (на рис. 1 эти интервалы выделены серым). В табл. 1 представлены значения фильтрационных свойств для каждого образца с пористостью >3%.

Таблица 1

Фильтрационные свойства образцов из скважины А с пористостью >3% из технически стимулируемых коллекторов

Параметры	Глубина, м		
	3130,60	3134,55	3134,55
Пористость, %	4,58	5,37	4,90
Проницаемость с поправкой по Клинкенбергу, мД	0,001	0,001	0,001

Открытая пористость по газу в скважине В изменяется от 0,27% (3052,85 м) до 5,37% (3062,97 м) (рис. 2, а). Абсолютная газопроницаемость варьирует от 0 до 0,588 мД (3056,25 м). Значения открытой пористости, позволяющие отнести исследуемые прослой к коллектору, отмечены в интервале глубины 3071,12–3061,0 м (на рис. 2 интервал выделен серым). В табл. 2 представлены значения фильтрационных свойств для каждого образца с пористостью >3%.

Открытая пористость по газу в скважине С изменяется от 0,28% (3165,14 м) до 6,95% (3182,61 м) (рис. 3, а). Абсолютная газопроницаемость варьирует от 0 до 0,895 мД (3185,97 м). Прослой с повышенными значениями открытой пористости вы-

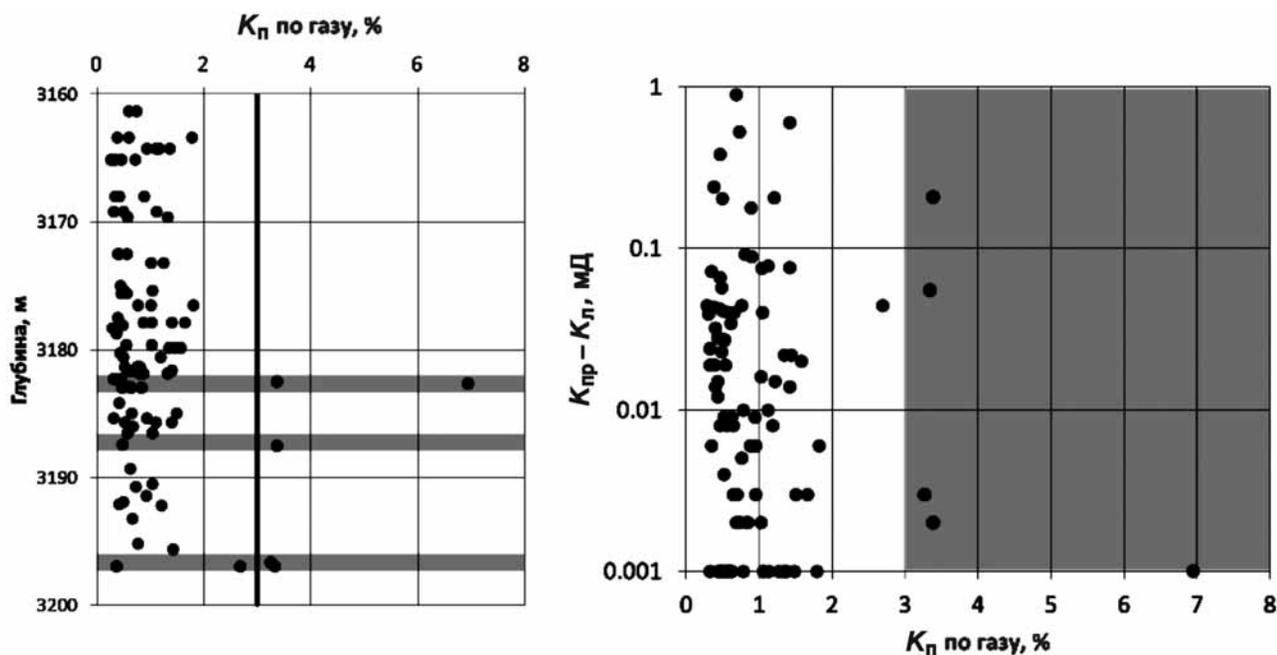


Рис. 3. Фильтрационно-емкостные свойства скважины С: а — распределение открытой пористости по газу ( $K_p$  по газу) по разрезу (серое — интервалы с  $K_p$  по газу  $>3\%$ ); б — сопоставление открытой пористости по газу с абсолютной газопрооницаемостью с поправкой по Клинкенбергу ( $K_{пр}-K_{л}$ )

явлены в интервале глубины 3196,95–3196,65 м, на глубине 3187,5 м и в интервале 3182,61–3182,48 м. Эти интервалы выделены как наиболее перспективные объекты для изучения в качестве коллектора (на рис. 3 эти интервалы выделены серым). В табл. 3 представлены значения фильтрационных свойств для каждого образца с пористостью  $>3\%$ .

Как видно из данных приведенных в табл. 1–3, в скважинах А, В и С нет четкого разделения на интервалы с технически стимулируемыми и естественными коллекторами, поэтому далее мы не использовали такое разделение и считаем выделенные интервалы коллекторскими.

**Межскважинная корреляция.** Баженовская свита представляет собой тонкое чередование пород с разным содержанием кремнистой (кр), глинистой (гл), карбонатной (известняковой (изв) и доломитовой (дол)) составляющих, а также органического вещества. Выделение групп литотипов базировалось на следующей классификации: в название породы включены составляющие, количество которых в породе  $>10\%$  по возрастанию их доли в породе; при содержании в породе какой-либо из составляющих  $>50\%$  порода названа по этой составляющей (например, силицит, известняк и др.). Силицит-радиолярит выделен по содержанию радиолярий  $>70\%$ . ОВ, находящееся в матрице породы, отнесено к керогеновой составляющей (кер) [Макарова и др., 2017].

Для прослеживания выделенных групп литотипов по профилю проведена межскважинная корреляция между скважинами А, В и С. Отметим, что скважины А и В, согласно структурной карте, находятся во впадинах, тогда как скважина С расположена выше по изогипсам, на склоновой части

Таблица 2

Фильтрационные свойства образцов из скважины В с пористостью  $>3\%$

Параметры	Глубина, м				
	3061,00	3062,97	3064,43	3066,12	3067,42
Пористость, %	4,00	5,37	4,02	3,95	4,00
Проницаемость с поправкой по Клинкенбергу, мД	0,485	0,007	0,002	0,539	0,007
Глубина, м	3068,76	3068,76	3069,60	3069,85	3071,12
Пористость, %	5,31	4,58	5,04	5,26	4,23
Проницаемость с поправкой по Клинкенбергу, мД	0,005	0,006	0,007	0,002	0,033

Примечания. Полу жирным выделены естественные коллекторы, курсивом — технически стимулируемые.

Таблица 3

Фильтрационные свойства образцов из скважины С с пористостью  $>3\%$

Параметры	Глубина, м				
	3182,48	3182,61	3187,5	3196,65	3196,95
Пористость, %	3,38*	6,95	3,38	3,27	3,34
Проницаемость с поправкой по Клинкенбергу, мД	0,207	0,001	0,002	0,003	0,055

\* См. примечания к табл. 2.

поднятия, которое находится западнее скважины В. Результаты межскважинной корреляции БС и переходных зон скважин А, В и С по группам литотипов с выделенными коллекторскими про-



Рис. 4. Межскважинная корреляция по кровле баженовской свиты скважин А, В и С по группам литотипов с вынесенными значениями фильтрационно-емкостных свойств для коллекторских прослоев (жирными линиями выделены прослои с  $K_p > 3\%$ ): 1 — глинисто-кремнистая порода, 2 — керогеново-глинисто-кремнистая порода, 3 — керогеново-глинистый силицит, 4 — глинисто-кремнистый доломит, 5 — силицит (радиолярит), 6 — кремнисто-керогеново-глинисто-известняковая порода, 7 — известняково-керогеново-глинисто-кремнистая порода, 8 — карбонатно-глинисто-керогеново-кремнистая порода, 9 — керогеново-глинисто-кремнисто-карбонатная порода, 10 — интервалы с пористостью  $> 3\%$

слоями и нанесенными значениями ФЕС для данных прослоев представлены на рис. 4.

В результате сопоставления ФЕС и литологического состава установлено, что коллекторские интервалы в исследуемых скважинах приурочены к определенным литотипам и разбиты на два типа по основным процессам порообразования. Пористость всех выявленных интервалов вторичная.

Первый тип коллекторских интервалов — интервалы, образовавшиеся в результате растворения и перекристаллизации отдельных минералов. В скважинах А и С по одному коллекторскому интервалу приурочено к силициту-радиоляриту (с выраженной биоморфной структурой). В скважине А пористый интервал силицит-радиолярита расположен на глубине 3130,60 м ( $K_p = 4,58\%$ ,  $K_{пр} = 0,001$  мД); в скважине С — в интервале глубин 3182,61–3182,48 м ( $K_p = 3,38 \div 6,95\%$  и  $K_{пр} = 0,001 \div 0,207$  мД). Пористость вторична, связана с растворением скелетов радиолярий, перекристаллизацией кремнистого вещества [Balushkina et al., 2014]. В этих скважинах расположение скелетов радиолярий в породах не привело после их растворения к формированию связанной системы пор,

на что указывает изолированность пор (рис. 5, а–в). В случае большего количества скелетов радиолярий и их соприкосновения можно было бы ожидать связанные между собой поры, как на рис. 5, г–е и, соответственно, большие значения ФЕС. В данном же случае такие прослои обладают низкой проницаемостью, большинство из них должно быть отнесено к технически стимулируемому коллекторам.

Второй тип коллекторских интервалов — интервалы, в которых происходило преобразование ОВ. В скважине В в керогеново-глинистом силиците и керогеново-глинисто-кремнистой породе выделен коллекторский интервал на глубине 3171,12–3061,00 м с  $K_p = 3,95 \div 5,37\%$  и  $K_{пр} = 0,002 \div 0,539$  мД. При этом все ОВ в скважине В по геохимическим данным более преобразовано. ОВ находится на стадии катагенетической преобразованности на уровне главной зоны нефтеобразования МК2-3, что подтверждается значениями параметров  $T_{max}$  (442–449 °С) и водородным индексом (250–380 мг УВ/г ТОС). ОВ относится к II типу (рис. 6). Пустотное пространство этих прослоев предположительно возникло за счет

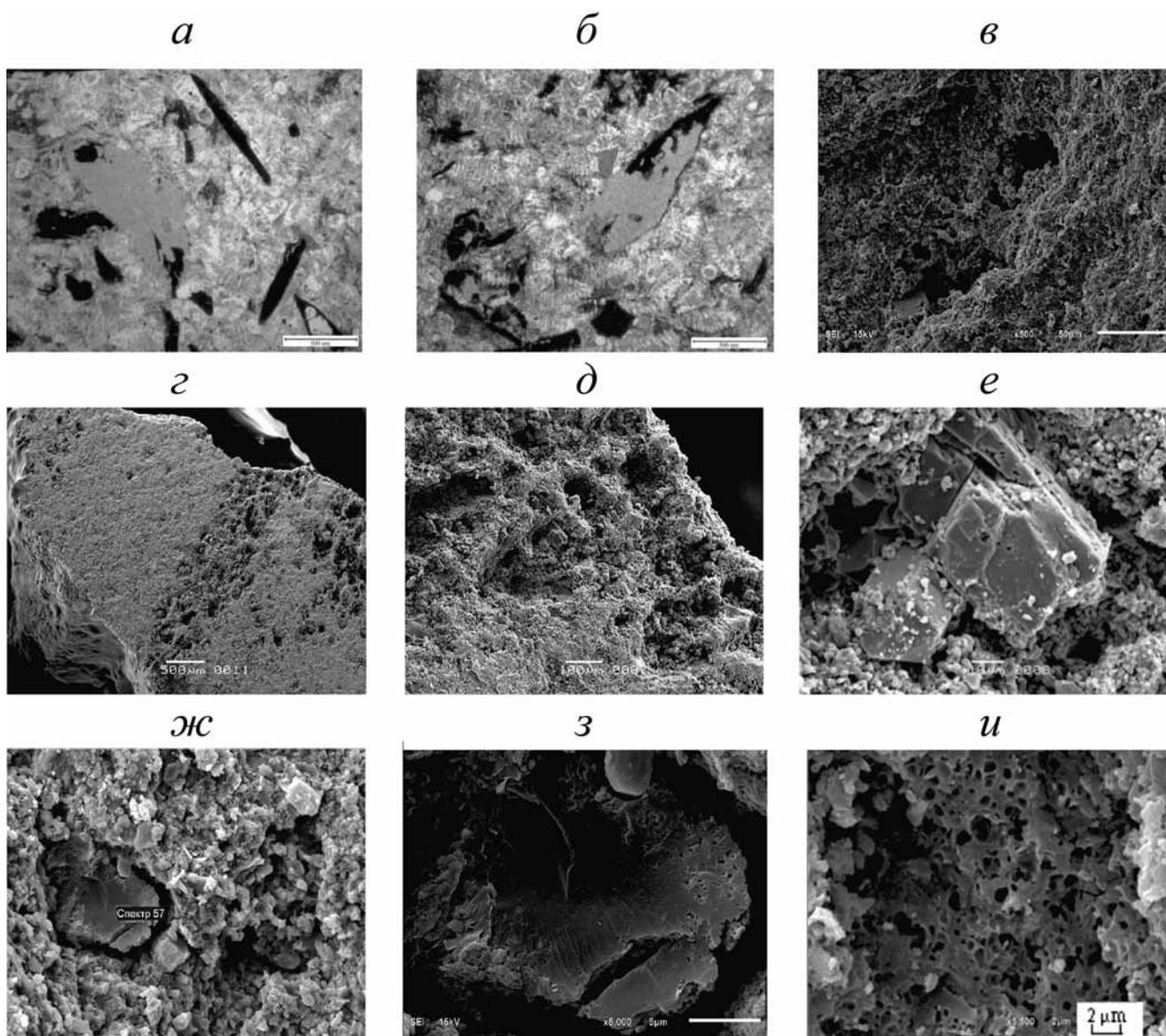


Рис. 5. Микрофото силицита-радиолярита: *a, б* — внутрiformенные поры и каверны выщелачивания, *в* — образец с глубины 3182,61 м, скважина С; *г, д, е* — пустоты растворения раковин радиолярий в карбонатно-кремнистой породе с  $K_p$  12,11% при разном увеличении (растровый электронный микроскоп) по [Balushkina et al., 2014]; *ж–и*: микрофотографии пористого керогена в кремнистой породе: *ж, з* — образец с пористостью 4,02% из скважины В, глубина 3064,43 м при разном увеличении, *и* — соединение пор в керогене, по [Balushkina et al., 2016]

преобразования керогена: произошло выделение углеводов при локальном прогреве пород и формировании трещин между глинисто-кремнистой матрицей и керогеном за счет его дозревания (рис. 5, *ж–з*). Также на микрофотографиях видны поры, образовавшиеся в краевых зонах в самом керогене. Дальнейший прогрев мог бы привести к увеличению размеров пор в керогене и соединению их между собой, в результате чего в керогене поры достигали бы размера от 10 нм до нескольких микрометров и были бы связаны между собой, обеспечивая высокую пористость пород (рис. 5, *и*) [Калмыков, 2016]. Важно отметить, что скважина В на востоке месторождения находится ближе других к возвышенности, для которой выявлены повышенные значения пластовой температуры,

однако локального нагрева не хватило для того, чтобы сформировалась связанная система пор в керогене (рис. 5, *и*).

**Заключение.** Установлено, что фильтрационно-емкостные свойства образцов керна и литологический состав отличаются в зависимости от расположения скважин по площади месторождения и протекания различных вторичных процессов, выявлено, к какой группе литотипов приурочен каждый коллекторский интервал. В скважинах А и С в качестве коллекторских прослоев выделяется силицит-радиолярит, поры которого, как правило, изолированы одна от другой, коллектор здесь технически стимулируемый. В скважине В коллектор представлен керогеново-глинистым силицитом и керогеново-глинисто-кремнистой породой,

Рис. 6. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена ( $HI/T_{max}$ ) по данным пиролитических исследований образцов керн баженовской свиты Приобского месторождения, по [Kozlova et al., 2015] с изменениями

пористость в которой образована в результате преобразования ОВ и формирования пустот между керогеном и минеральной матрицей, вероятно, в результате локального прогрева.

Таким образом, основные поробразующие процессы на территории Приобского месторождения в изученных скважинах представлены выщелачиванием и перекристаллизацией кремнистого вещества (скважины А и С), а также дополнительным локальным прогревом (преимущественно в скважине В). Необходимо более детальное изучение керна пород баженовской свиты в этих и других скважинах, а также выявление признаков протекания вторичных процессов и их поисковых критериев с использованием данных ГИС и сейсмических исследований.

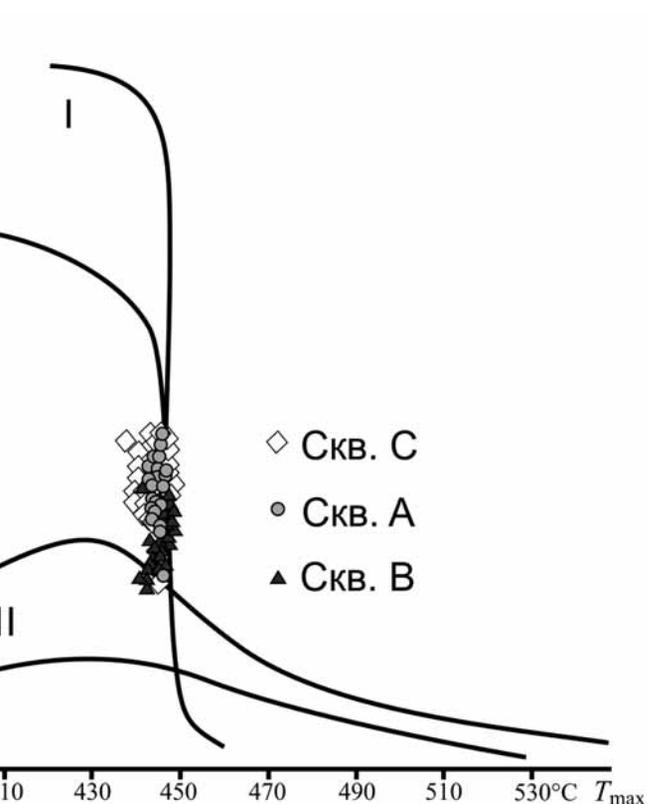
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.Д., Немова В.Д., Колосков В.Н. Литологические особенности строения нижнетутлеимской подсвиты Фроловской нефтегазоносной области в связи с особенностями ее нефтеносности // Геология нефти и газа. 2009. № 2. С. 27–33.

Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Кирюхина Т.А. и др. Закономерности строения баженовского горизонта и верхов Абалакской свиты в связи с перспективами добычи нефти из них // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 48–61.

Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтегазонасного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: Автореф. докт. дисс. М., 2016.

Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А. и др. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогеносыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестн. Моск. Уни-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44–53.



Макарова О.М., Коробова Н.И., Калмыков А.Г. и др. Основные типы пород баженовской свиты на Сургутском своде и сопредельных территориях // Георесурсы. 2017. Спецвып. Ч. 2. С. 155–164.

Balushkina N.S., Kalmykov G.A., Belokhin V.S. et al. Siliceous reservoirs of the bazhenov formation, the sredny nazym oil field, and the structure of their pore space // Moscow Univ. Geol. Bull. 2014. Vol. 69, N 2. P. 91–100.

Balushkina N.S., Kalmykov G.A. Cavity structure in oil-saturated bazhenov and abalak shale rock in the western siberian basin // Moscow Univ. Geol. Bull. 2016. Vol. 71, N 1. P. 71–80.

Kozlova E.V., Fadeeva N.P., Kalmykov G.A. et al. Geochemical technique of organic matter research in deposits enrich in kerogene (the bazhenov formation, west siberia) // Moscow Univ. Geol. Bull. 2015. Vol. 70, N. 6. P. 409–418.

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации

УДК 553.983, 553.982.23

М.С. Топчий<sup>1</sup>, Н.В. Пронина<sup>2</sup>, А.Г. Калмыков<sup>3</sup>, Г.А. Калмыков<sup>4</sup>, М.М. Фомина<sup>5</sup>,  
Ю.А. Карпов<sup>6</sup>, Е.В. Козлова<sup>7</sup>, Н.П. Фадеева<sup>8</sup>

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОРОДАХ БАЖЕНОВСКОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ФОРМАЦИИ

Одна из наиболее известных и перспективных сланцевых формаций России — баженовская свита. Неоднозначность представлений о ее геологических особенностях, вызванная сложным и неоднородным строением толщи, притягивает внимание многих исследователей. Нами баженовская свита выделена в совокупности с ее стратиграфическими аналогами в баженовскую высокоуглеродистую формацию (БВУФ). Рассмотрены основные характеристики ее выделения и распространения по площади, а также геологическое строение. Будучи нетрадиционным коллектором углеводородов, БВУФ обладает свойствами нефтематеринской породы, к основным характеристикам которой относятся органическое вещество, его тип и зрелость. Представлены результаты изучения органического вещества различными методиками на микроуровне, а также их интеграция с более крупномасштабными исследованиями. Необходимость детального рассмотрения органического вещества БВУФ обоснована тем, что оно имеет смешанный состав и как следствие разную степень преобразованности и пространственного расположения породе.

*Ключевые слова:* баженовская свита, органическое вещество, баженовская высокоуглеродистая формация.

One of the most famous and promising shale formations in Russia is the Bazhenov formation. The ambiguity of ideas about its geological features, caused by the complex, heterogeneous structure of the strata, attracts the attention of many researchers. In this work, the Bazhenov formation is singled out in conjunction with its stratigraphic counterparts in the Bazhenov high-carbon formation (BVCHF). In this were considered the main characteristics of its allotment and distribution over the area, as well as the geological structure. Being an unconventional reservoir of hydrocarbons, BVCHF has properties of a petroleum-bearing rock, one of the main characteristics of which is organic matter, its type and maturity. The paper presents the results of the study of organic matter by various methods at the micro level, as well as their integration with larger-scale studies. The need for detailed consideration of the organic matter of the BVCHF is justified by the fact that it has a mixed composition and, as a consequence, a different degree of transformation and spatial distribution.

*Key words:* Bazhenov formation, organic matter, Bazhenov high-carbon formation.

**Введение.** Впервые баженовская свита (БС) была выделена и охарактеризована Ф.Г. Гурари в 1959 г. как пачка марьяновской свиты [Брадучан и др., 1986]. Примерно тогда же были получены промышленные притоки нефти из баженовской свиты. С тех пор и до сегодняшнего момента добыча нефти из нее по разным оценкам составила от 11 до 13,3 млн т [Брехунцов, Нестеров, 2010]. Важно отметить, что в геологическом плане не-

которые исследователи рассматривают не только баженовскую свиту, но и ее стратиграфические аналоги. Такое рассмотрение базируется на выделении баженовской высокоуглеродистой формации (БВУФ), которая охватывает позднеюрско-раннемеловой возрастной диапазон (до берриаса включительно) и отличается от вмещающих отложений по наличию концентрированного аквагенного органического вещества (АКОВ),

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* m.s.topchiy@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* gena64@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент; *e-mail:* nvprncl@mail.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* fomina-msu@mail.ru

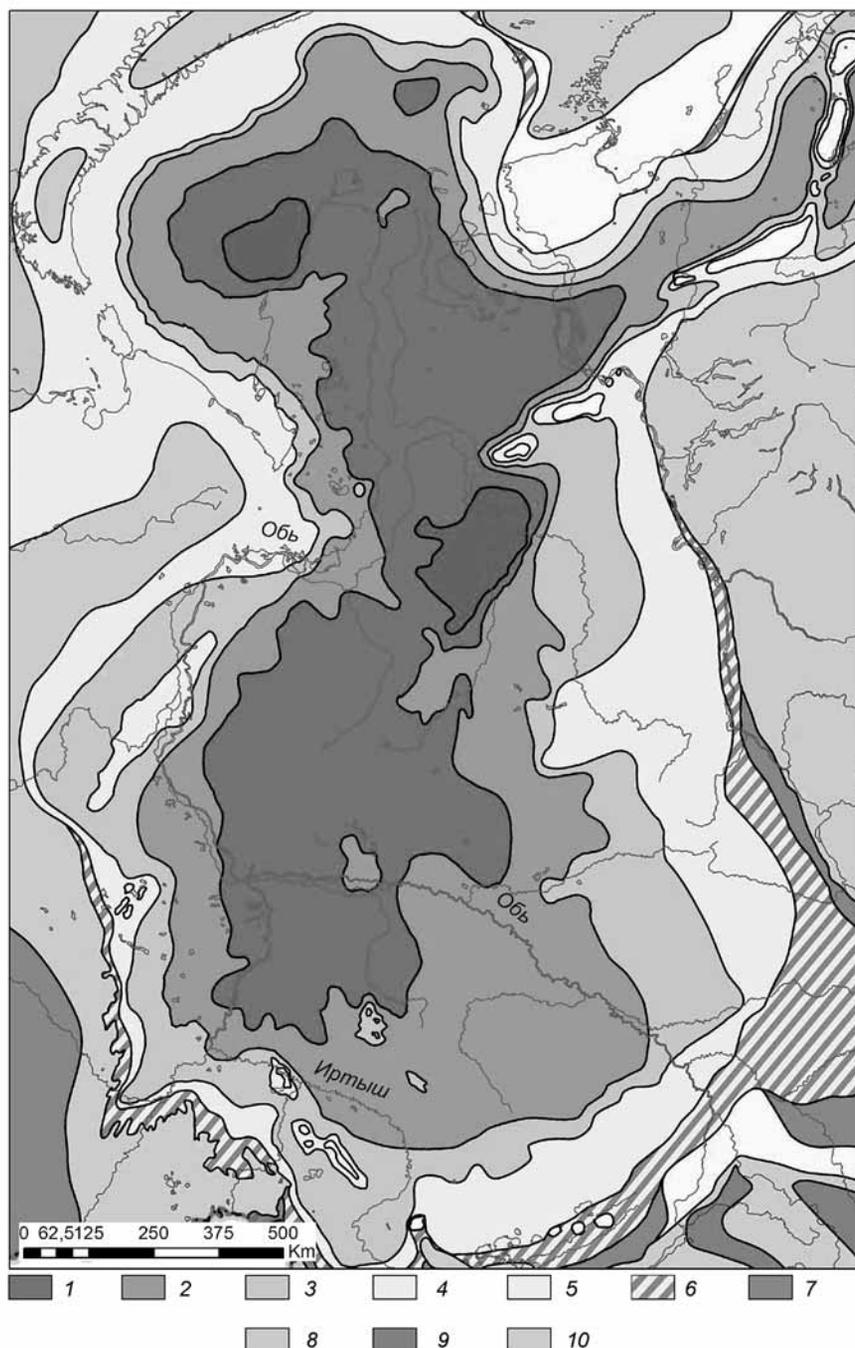
<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* y.a.karpov@yandex.ru

<sup>7</sup> Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов, ст. науч. с.; *e-mail:* miliyakozlova@mail.ru

<sup>8</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, вед. науч. с.; *e-mail:* fadееva\_nataly@mail.ru

Рис. 1. Палеогеографическая схема Западной Сибири, волжский век [Конторович и др., 2013]: области морского осадконакопления: 1 — море, глубина >400 м; 2 — море глубокое, 200–400 м; 3 — море, глубина 100–200 м; 4 — море мелкое, глубина 25–100 м; 5 — море мелкое, глубина <25 м; области переходного осадконакопления: 6 — равнина прибрежная, временами заливавшаяся морем (осадки пойменные, озерно-болотные, русловые, дельтовые, береговых баров, пляжевые); области континентального осадконакопления: 7 — равнина низменная, аккумулятивная (осадки русел, пойм, озер и др.); 8 — равнина денудационно-аккумулятивная; области размыва: 9 — равнина возвышенная (денудационная суша), 10 — горы низкие; 11 — государственная граница

??? На схеме 10



содержание которого составляет более 2,5% (предложено Н.Б. Вассоевичем) [Баженова и др., 2000]. В данном случае БВУФ включает в себя по латерали не только отложения БС, но и тутлеймской, мулымынской свит, и захватывает часть отложений яновстанской свиты, например, в Мессояхской впадине.

БВУФ обладает сложным строением, повышенным содержанием органического вещества (ОВ) и изменчивостью свойств по территории. При этом фациальные обстановки осадконакопления и вторичные процессы, связанные с изменением литологического состава и преобразованием ОВ, могут приводить к формированию коллекторских прослоев в толще. В то же время проницаемость пористых интервалов иногда невысокая, в свите может содержаться большое количество сорбированных углеводородов (УВ), что предопределяет необходимость проведения дополнительных геолого-технологических мероприятий для получения притока. Такие работы требуют знания о составе и генетической зрелости ОВ, поскольку от этого зависят как коллекторские характеристики (керогеновая пористость), так и количество генерированных УВ и гетероатомных соединений (тяжелые смолы, асфальтены) и адсорбционная способность керогена. При этом исследования ОВ часто ограничиваются стандартным комплексом на макроуровне (пиролиз, иногда экстракция хлороформом из измельченного образца), которые дают обобщенные характеристики.

Наша работа была сфокусирована на комплексном изучении ОВ на микроуровне с целью выявления особенностей его строения и состояния в конкретных образцах, на особенностях распределения УВ в объеме образца, его приуроченности, характеристиках генетической зрелости конкретных органических объектов. Помимо стандартной характеристики пород методом пиролиза нами использованы результаты углепетрографических исследований, анализы методом сканирующей электронной микроскопии, конфокальной микроскопии.

**Геологическое строение БВУФ.** Время осадконакопления пород БВУФ оценивается как титон–берриас. Исследуемая формация подстилается сложнопостроенной толщей морских карбонат-

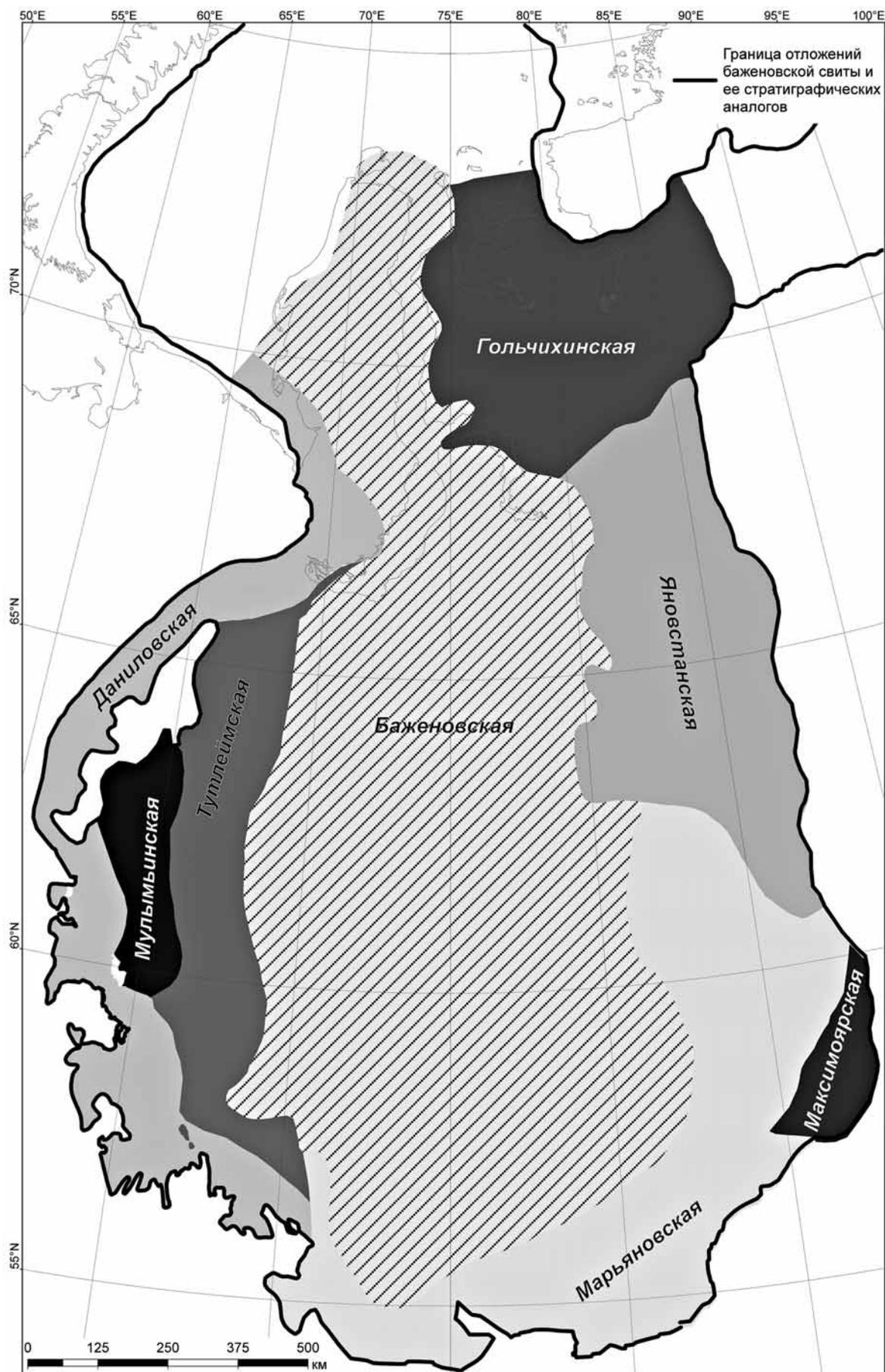


Рис. 2. Схема распространения свит, частично или полностью входящих в состав баженовского горизонта, по [Брадучану и др., 1986] с дополнениями

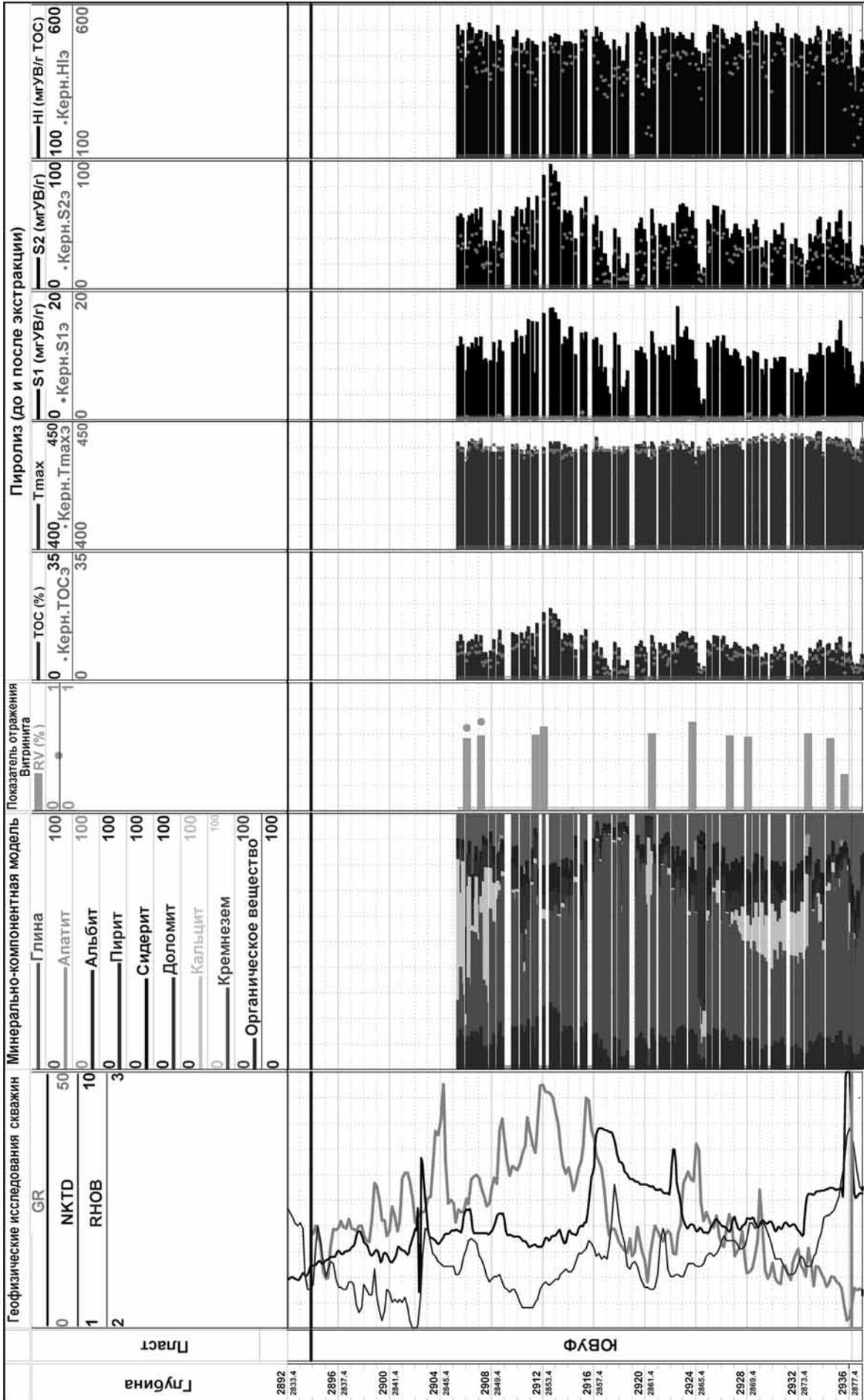


Рис. 3. Геолого-геофизический планшет с результатами пиролизами пиролитических и углепетрографических исследований пород БВУФ

но-глинистых пород, обогащенных глауконитом и остатками ростров белемнитов, относимых к георгиевской или абалакской свитам (верхний оксфорд–нижний титон) [Захаров, 2006]. Перекрываются отложения БВУФ породами неокомского клиноформного комплекса, в составе которого выделяют ахскую, сортымскую и другие свиты [Атлас..., 2004]. Территория Западной Сибири на момент баженовского времени представляла собой морской бассейн, максимальная глубина которого по разным оценкам составляла 200–500 м, что подтверждается находками остатков макро- и микробиоты (рис. 1).

Морской бассейн заселяли в основном фито-зоопланктонные и нектонные организмы, представленные радиоляриями, которые обитали в приповерхностных водах, а бентосные организмы имели подчиненное значение. Остатки нектонных организмов в породах представлены раковинами аммонитов, рострами белемнитов, крючками (онихиты) палеокальмаров и скелетами рыб. Среди бентосных организмов преобладали бухии и иноцерамы, причем в подавляющем большинстве пород присутствуют остатки раковин или бухий, или иноцерам [Доманикиты..., 1982; Захаров, 2006; Панченко и др., 2015].

Формирование отложений происходило в наиболее удаленной от берега центральной впадине, где отлагались кремнистые илы, в различной степени глинистые, обогащенные ОВ. Осадконакопление характеризовалось небольшой скоростью (0,002–0,004 мм/год) в условиях стабильного седиментационного режима на протяжении 5–8 млн лет [Дорофеева и др., 1979]. Такие условия способствовали накоплению осадков относительно небольшой мощности (20–30 м) с большим количеством ОВ. На подводных равнинах, окружавших псевдоабиссальную впадину, откладывались осадки, сформировавшие тутлеимскую, мулымьинскую, марьяновскую, даниловскую, яновстанскую свиты (рис. 2). Входящие в состав баженовского горизонта тутлеимская и мулымьинская свиты характеризуются высоким содержанием ОВ. В отложениях марьяновской, даниловской, яновстанской свит содержание ОВ значительно меньше и присутствует не во всем объеме этих свит, а только в отдельных пропластах [Решение..., 2004]. Такая латеральная и вертикальная неоднородность БВУФ ставит перед исследователями задачу систематизации методов изучения ОВ как на локальном, так и на региональном уровне; кроме того, необходимо районировать и типизировать отложения.

Указанные условия определили формирование нефтематеринской толщи баженовской высокоуглеродистой формации. Однако, как упоминалось выше, на образование коллекторских интервалов сильно влияют вторичные процессы, к которым могут относиться, в частности, растворение и переотложение различных минералов, гидротер-

мальные процессы и процессы прогрева. Такие процессы могут приводить к существенным изменениям в строении ОВ вследствие его дозревания и перехода на высокие градации катагенеза [Васильев и др., 2015]. Учитывая, что такие явления локальны, необходимо проводить исследования на макроуровне для выяснения особенностей распространения ОВ в породах и их характеристик.

**Методы исследования.** Пиролиз образцов породы выполнялся на пиролизаторе Rock-Eval 6. В интервале температуры до 300 °С (пик  $S_1$  ( $S_0+S_1$ )) происходит десорбция свободных ( $C_1-C_7$ ) и сорбированных ( $C_8-C_{33}$ ) углеводородов (УВ), входящих в состав попутных газов и нефтей (УВ метанового ряда, ароматические УВ и др.). В интервале термического разложения керогена при 300–650 °С (пик  $S_2$ ) происходит собственно пиролиз, в результате которого ОВ превращается в УВ. Третий пик ( $S_3$ ), измеряемый детектором теплопроводности при 300–390 °С, фиксирует количество диоксида углерода. Продукты пиролиза, соответствующие вышеуказанному пику, измеряются в мг/г породы. Температура, при которой отмечается наибольшая интенсивность выхода УВ в пределах пика  $S_2$ , обозначается как  $T_{max}$ . Нефтегазоматеринский потенциал породы определяется суммой двух пиков ( $S_1+S_2$ ), он измеряется в кг УВ/т породы или мг УВ/г породы. Затем в печи окисления происходит программированный нагрев породы (300–850 °С) в атмосфере кислорода. Общее содержание углерода ТОС (Total Organic Carbon) вычисляется с учетом того, что 83% в элементном составе УВ пиков  $S_1$ ,  $S_2$  приходится на углерод.

Степень выработанности керогена отражается в коэффициенте PI (Production Index), он равен  $S_1/(S_1+S_2)$ , его значения, составляющие 0,1–0,4, отвечают условиям главной зоны нефтеобразования и, следовательно, могут служить относительной мерой катагенеза. Водородный индекс HI (Hydrogen Index) представляет собой отношение количества органических соединений  $S_2$  на содержание органического углерода (ТОС) в образце (мг УВ/кг ТОС). Кислородный индекс OI (Oxygen Index) показывает количество  $CO_2$  (пик  $S_3$ ) относительно  $C_{орг}$  (мг  $CO_2$ /г ТОС).

Экстракцию образцов проводили хлороформом в аппарате Сокслета. Процесс экстракции считается завершенным, когда концентрация битумоида в хлороформе составляла <0,000625%.

Для исследования ОВ в БВУФ выполнены углепетрографические исследования, анализ образцов методами растровой электронной микроскопии и растровой электронной микроскопии с фокусированным ионным пучком. Углепетрографические исследования проводились в лаборатории угля кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на установке QD1302 «Craic Technologies».

Исследования структуры порового пространства, взаиморасположения породообразующих минералов и состава образцов ядерного материала выполнены на кусках (сколах) и аншлифах 10 образцов с помощью растрового электронного микроскопа «JEOL 6610 LV», сопряженного с системой энергодисперсионного рентген-спектрометрического анализа «Oxford Instruments INCAХact». Для специфической подготовки образца перед микроскопированием применялась система холодно-плазменной металлизации «JEOL JFC1600». Материал напыления — платина. Обработку результатов проводили при помощи программного обеспечения SEM Control User Interface, ver. 7.11 «Jeol Technics LTD». Эта методика исследования наиболее информативна, так как отражает полную информацию о структуре порового пространства. Изучение образцов с использованием фокусированного ионного пучка проводилось на растровом электронном микроскопе «Helios NANOLAB 600I».

**Результаты исследований и их обсуждение. Геохимические характеристики баженовской свиты.** Для оценки характеристик отложений БВУФ, выделения ее границ, определения нефтегенерационного потенциала, типа и зрелости ОВ проводят геохимические исследования образцов ядерного материала. На рис. 3 представлен пример геолого-геофизического планшета с результатами пиролитических и углепетрографических исследований. По каротажным признакам баженовская свита характеризуется большими значениями на кривой гамма-каротажа, высокими сопротивлением и значениями НІ, пониженными значениями плотностного каротажа. К основным характеристикам, по которым, в частности, выделяют нефтенасыщенные прослои, относятся параметры  $S_1$  и  $S_2$ , а также индекс продуктивности (PI). Повышенные значения параметра  $S_1$  относительно параметра  $S_2$ , также выражаемые через высокие значения PI, свидетельствуют о наличии свободной нефти в порах породы и могут быть идентификатором коллектора в БВУФ. Пиролитические параметры  $T_{max}$  и НІ, а также параметр  $R_o$  — величина коэффициента отражательной способности витринита, определяемая с помощью углепетрографических исследований, позволяют оценить зрелость ОВ, а также определить его тип.

Как видно на рис. 3, в исследованной скважине значения НІ изменяются по разрезу, особенно при измерениях после экстракции, которые исключают вклад в этот параметр адсорбированных УВ и гетероатомных соединений (ГАС), при этом параметр  $T_{max}$  остается практически неизменным. Также для образца на границе БВУФ и подстилающих отложений получено более низкое значение параметра  $R_o$ . Эти отличия свидетельствуют, что ОВ в пределах одного разреза может несколько отличаться по степени преобразованности (рис. 4). Несмотря на то что в нефтяных компаниях и на-

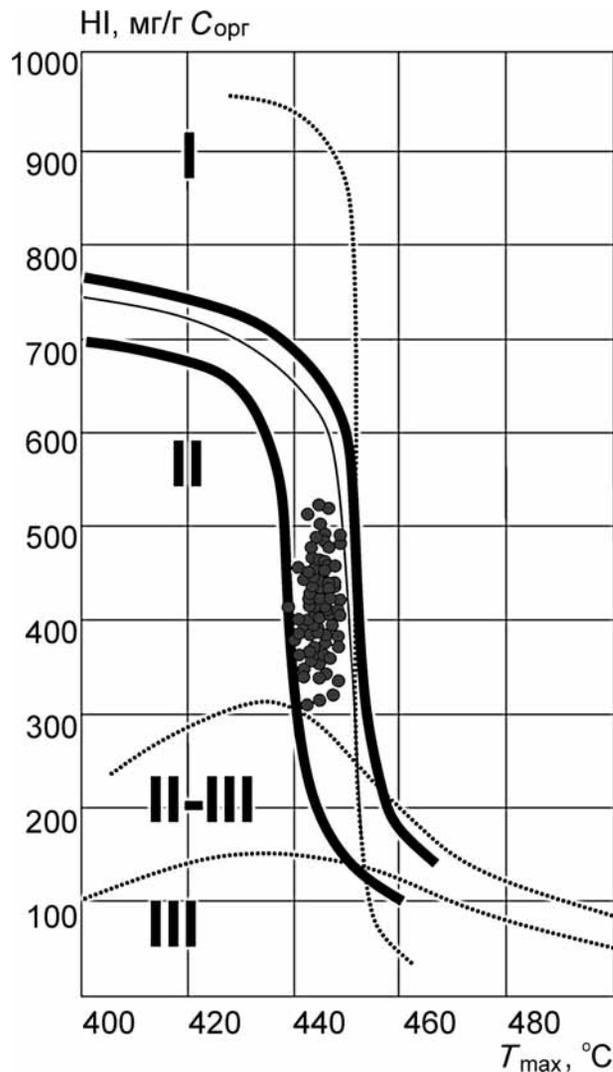


Рис. 4. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена

учно-исследовательских институтах для подсчета запасов определения характеристик БВУФ по территории и построения карт используют усредненные значения, необходимо провести более детальные исследования, которые позволят понять, насколько достоверно применение усредненных параметров, каковы особенности распределения органических компонентов (свободные и сорбированные УВ и ГАС, кероген), отличаются ли они по генетическим признакам и степени преобразованности.

**Органическое вещество баженовской свиты.** Органическое вещество — достаточно общий термин, включающий в себя все соединения в образце, состоящие преимущественно из углерода, водорода, кислорода, азота и серы. В то же время органические соединения существенно различаются не только по составу, но и по агрегатному состоянию (газообразные, жидкие и твердые) и степени свободы (свободные и физически связанные). Ранее было показано, что в БВУФ присутствует нефть в открытых, закрытых и запечатанных порах, а также физически связанные УВ, ГАС и кероген

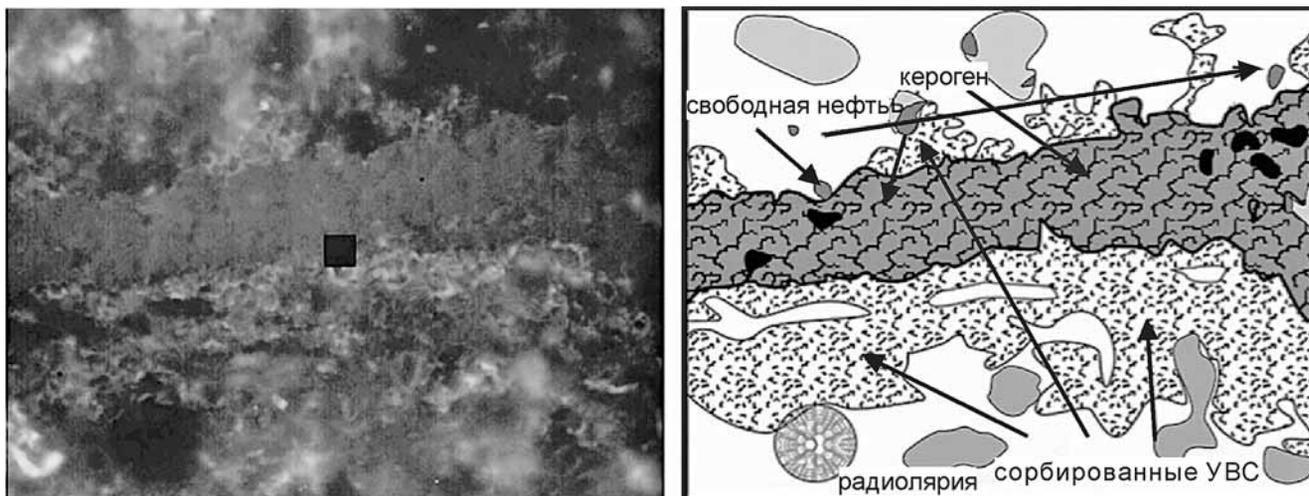


Рис. 5. Микрофото ОВ баженовской свиты под люминисцентным микроскопом с темно-бурым микропрослоем керогена, окруженным люминисцирующим сиенгитичным битумоидом (слева), а также схематичное соотношение нефти и сорбированных УВС в поровом пространстве пород (справа) (выполнено Н.В. Прониной)

[Калмыков, 2017]. При извлечении кернового материала из скважин за счет перепада давления происходит дегазация породы, в результате которой пузырьки газа вытесняют нефть из порового пространства. Поэтому при исследованиях пород основные изучаемые объекты — свободные УВ и ГАС в закрытых порах, связанные УВ и ГАС, а также кероген. При этом на микроуровне можно установить распределение битумоидов в объеме пород, определить зрелость конкретного твердого мацерала и его структуру.

В процессе углепетрографического изучения в составе исследованных образцов выделены следующие органические мацералы: битуминит (*bit*), битумы (*B*) и твердые битумы (*SB*), называемые также микринитом или остаточным ОВ. Все эти мацералы, по сути, — разные формы одного и того же вещества, проходящего трансформацию из исходного, твердого образования (*bit*) в жидкое (*B*) и оставшееся в твердой фазе, но значительно уменьшившееся в объеме остаточное ОВ (*SB*). Все три мацерала, присутствующие в образцах изученной коллекции согласно последней классификации органических мацералов [Pickel et al., 2017] можно отнести к группе липтинита.

Битуминит, первоначально образующийся из водорослей, встречается в виде комочков, линз и даже слоев разного размера и формы. Поскольку исходная водорослевая структура теряется очень рано, битуминит чаще всего характеризуется в дневном свете как аморфное ОВ серого цвета. Когда начинается генерация жидких УВ из битуминита появляется вторичная пористость внутри битуминитовых сгустков, их края приобретают неровный, кружевной контур. Одновременно наблюдается появление битумных оторочек вокруг битуминита, такие же битумы могут находиться внутри вторичных пор. Проникшие в минеральные окружающие породы битумы окрашивают их в

коричневый цвет; *SB* — твердая, обуглероженная часть ОВ после генерации жидких УВ, обычно *SB* очень небольшого размера.

Наблюдаемое состояние ОВ в исследованных образцах, их совместное нахождение служат прямыми признаками главной фазы нефтеобразования. Отметим тот факт, что состояние ОВ отражается в таких оптических свойствах, как показатель отражения битуминита ( $BR_o$ , %) и люминесцентное свечение. В БВУФ при отсутствии гумусовых мацералов были выполнены замеры показателя отражения по битуминитам, которые можно считать эквивалентами витринита. Для пересчета использована следующая формула [Liu, Shi, 1994]:

$$R_o = 0,668 \cdot BR_o + 0,346.$$

Характерный пример распространения органического вещества в породе приведен на рис. 5.

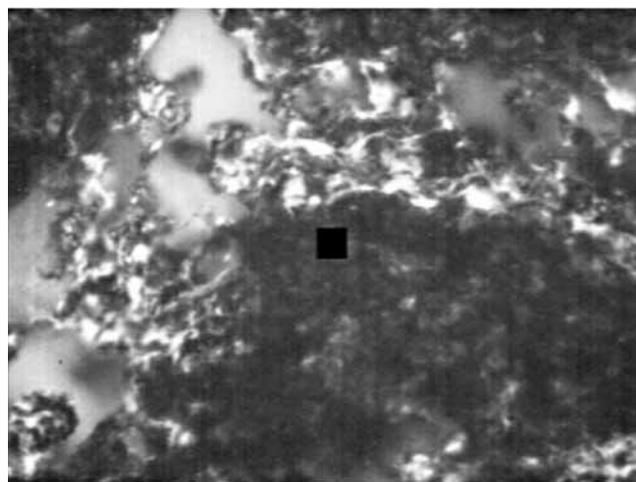


Рис. 6. Фото образца А породы баженовской свиты с равномерным распределением УВ и ГАС в матрице, сделанное при помощи конфокальной микроскопии (размер черного квадрата 5 мкм)

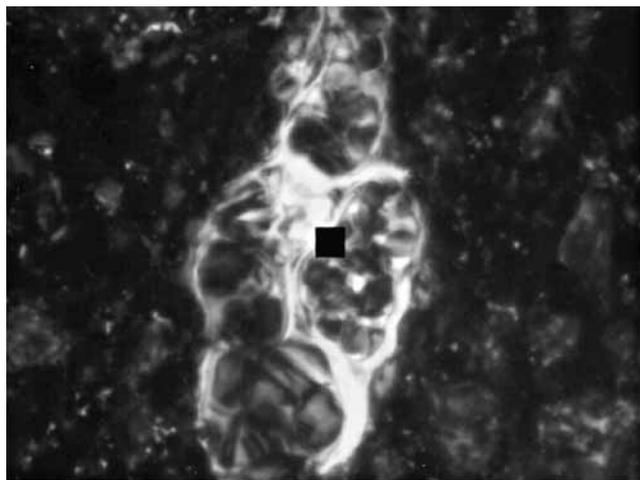


Рис. 7. Фото образца Б породы баженовской свиты со скоплением УВ и ГАС в структуре, предположительно в поре, сделанное при помощи конфокальной микроскопии (размер черного квадрата 5 мкм)

Как видно на рис. 5, в породах может присутствовать как кероген, представленный темным веществом в центре фотографии, так и отделившиеся от него сорбированные УВ и ГАС, которые в данном случае расположены в породе вокруг керогена, однако не покрывают его, что свидетельствует об окончании процесса выделения УВС из керогена, а также свободная нефть в порах.

Информация о расположении свободных и сорбированных УВ и ГАС в породе необходима для понимания строения породы, характеристики ее порового пространства, изучения возможных путей миграции УВ по разрезу, а с технологической точки зрения она может помочь оценить эффективность применения вторичных методов воздействия, связанных с использованием органических и неорганических растворителей и технологии гидроразрыва пласта. На рис. 6 и 7 представлены изображения образцов А и Б пород БВУФ из разных интервалов, которые отличаются составом и строением и получены методом люминисцентной

микроскопии. Как видно на рис. 6, яркое свечение, характерное для ОВ, показывает относительно равномерное его распределение в матрице породы. На рис. 7 видно, что ОВ приурочено к определенной структуре, предположительно к поре, образованной в результате растворения скелета радиоларии. Важно отметить, что в рассматриваемом случае в основном матриксе породы не встречаются УВ и ГАС. В результате сравнения образцов выявлено различие как в пористой структуре породы (образец А имеет пористую структуру, заполненную УВ и ГАС, в то время как поры образца Б единичны и не связаны между собой), так и в положении органических соединений в образце. С точки зрения разработки такие результаты показывают, что образец Б перспективнее разрабатывать, используя технологию гидроразрыва пласта, в то время как образец А эффективнее подвергать воздействию растворителей. При этом пиролитические характеристики образцов, особенно параметр  $S_1$ , будут похожи (в среднем 3,47 мг УВ/г породы до экстракции и 0,2 мг УВ/г породы после экстракции).

Помимо указанных вариантов распространения УВ и ГАС, в объеме возможен вариант, когда в процессе преобразования керогена формируются УВ соединения, которые не могут переместиться в объем образца в связи с отсутствием связанной пористой структуры в породе, а также вследствие сорбционных свойств керогена. В таком случае УВ соединения покрывают кероген, заполняя все адсорбционные центры (рис. 8). В дальнейшем в процессе генерации формируются УВ и ГАС, которые не могут адсорбироваться на поверхности и перераспределяются в ближайшем пространстве матрицы. Таким образом, в образце в битуминитах отчетливо видны зональность свечения и связь материнского мацерала с окружающими его битумными пленками. На рис. 8 видно, что содержание ОВ превышает 50% и представлено *B+bit*. Вся порода окрашена в коричневый цвет за счет *B*-пленок, *bit* образует линзы и комочки.

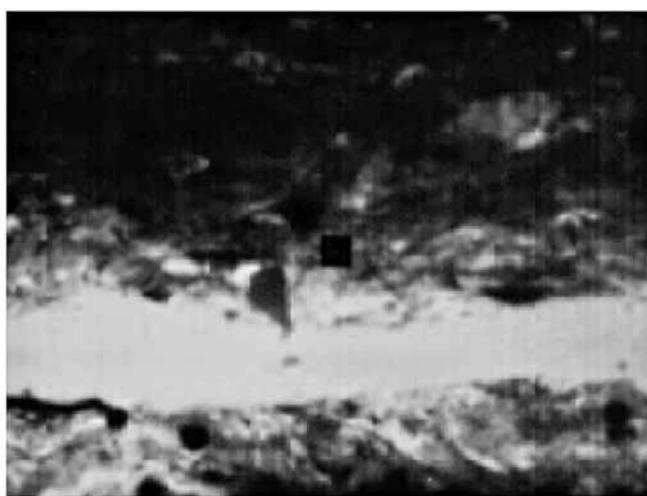
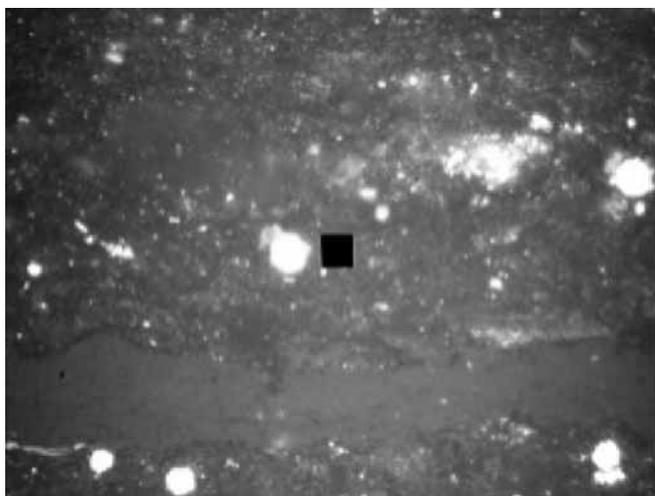


Рис. 8. Фото шлифов образца баженовской свиты в дневном (слева) и ультрафиолетовом (справа) свете (размер черного квадрата 5 мкм)

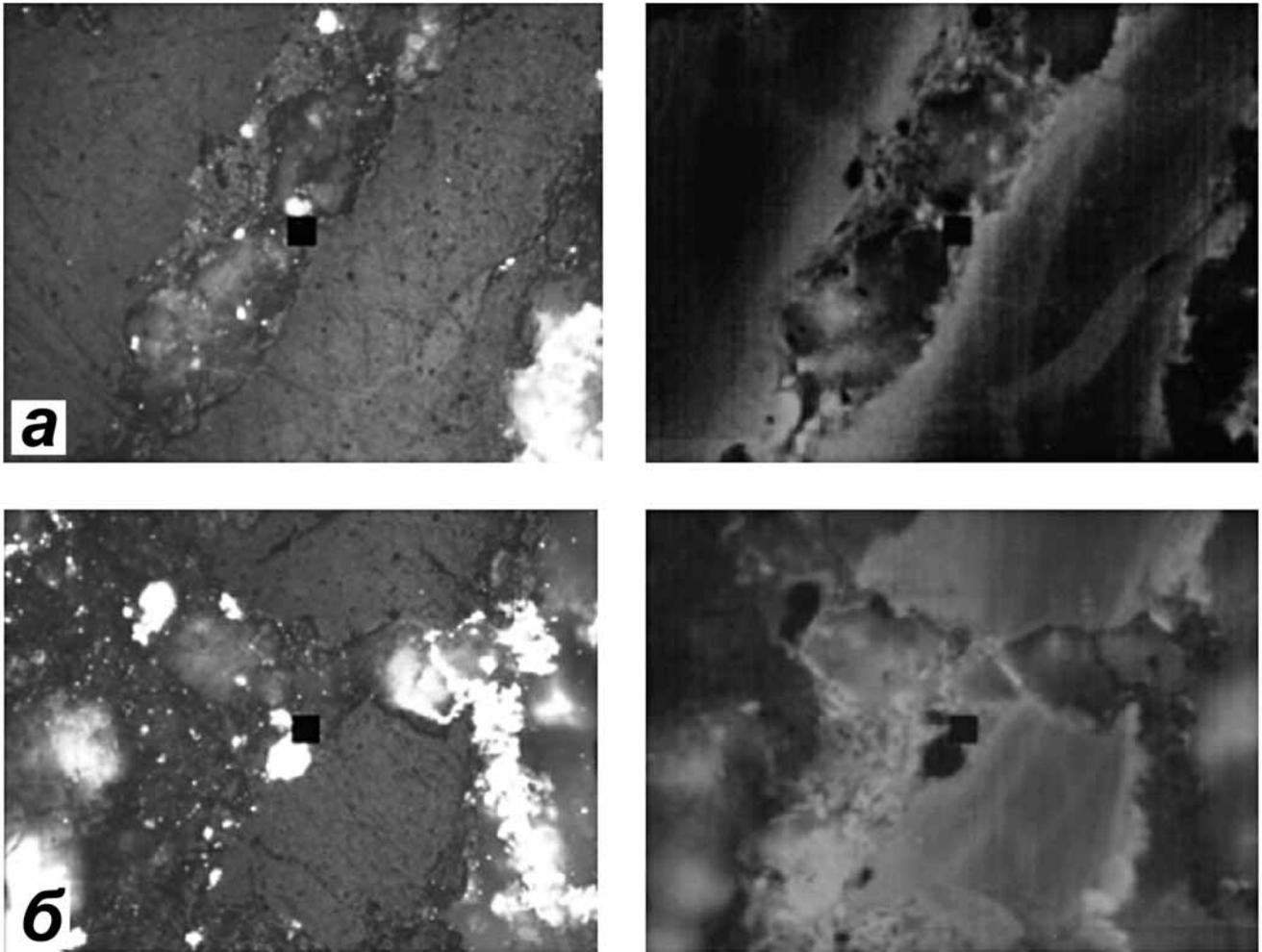


Рис. 9. Фото шлифов образца баженовской свиты (участки а и б имеют разную генетическую преобразованность) в дневном и ультрафиолетовом свете (размер черного квадрата 5 мкм)

Отчетливо видны и «остаточные» включения ОВ (SB) — мелкие светло-серые вкрапления в минеральном веществе. Такие УВ и ГАС нельзя извлечь без применения органических растворителей или теплового воздействия на породу.

Детальные углепетрографические исследования позволили не только оценить распределение УВ и ГАС в объеме образца и его возможную приуроченность к крупным порам или керогену, но и выявить в породах БВУФ в рамках одного образца разную степень зрелости ОВ. Как видно на рис. 9, в одном образце встречен как мацерал, на поверхности которого отсутствуют сгенерированные УВС, которые распределены в образце вокруг керогена, что свидетельствует о повышенной зрелости ОВ, так и мацерал, полностью покрытый сгенерированными и сорбированными УВС. В результате можно сделать вывод, что в рамках одного образца встречается ОВ с разной степенью преобразованности, что свидетельствует, вероятно, о разном составе и характеристиках исходного ОВ. Возможно, разница обусловлена растительным и животным происхождением ОВ в образце.

Полученные значения  $R_0$  были сопоставлены с результатами пиролиза, в частности с значением

параметра HI. На рис. 10 представлена зависимость остаточного генерационного потенциала породы, характеризуемого параметром HI, от показателя  $R_0$ . Светлым цветом выделены породы с разными показателями отражения витринита в одном образце. Как видно на рис. 10, нет точной зависимости между указанными параметрами. Можно предположить, что в исследованных разными методами образцах отличается соотношение ОВ разного состояния. Это обуславливает отклонения от общего среднестатистического значения HI по разрезу (значения HI исследованных нами образцов варьируют от 70 до 760 мг УВ/кг ТОС). Полученные результаты необходимо использовать для корректировки оценки зрелости ОВ и выявления формы распределения УВ и ГАС в породе.

Различие в происхождении и зрелости керогена в одном образце может быть доказано с помощью растровой электронной микроскопии. На рис. 11 показано наличие непористого керогена и керогена с развитой пористостью в одном образце. Учитывая, что прослой один и тот же, а вторичные процессы в таком случае должны затрагивать все ОВ, можно сделать вывод о разном происхождении ОВ в пределах одного образца. Исследование

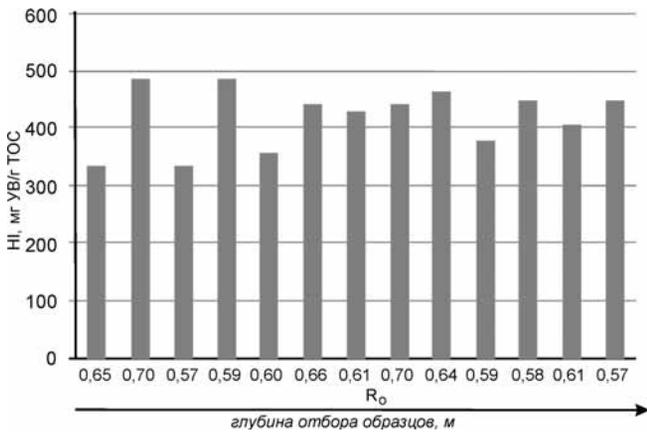


Рис. 10. Зависимость генерационного потенциала образца породы БВУФ от показателя отражения витринита  $R_o$

такого образца пиролитическим методом приведет к некорректным результатам — ту часть ОВ, которая обладает развитой поровой структурой, не удастся обнаружить только по данным пироллиза, коллекторские свойства также могут быть оценены с погрешностью.

Для подтверждения предположения, что керогеновая пористость может быть пропущена, был исследован образцы породы БВУФ с ОВ на стадии катагенеза МК2 с помощью растрового электронного микроскопа с фокусированным ионным пучком. Микрофотографии срезов приведены на рис. 12. Как видно на микрофотографии, в образце есть органическое вещество, практически не обладающее пористостью, в результате созревания которого образуются трещины и пустоты между керогеном и минеральной матрицей, а также органическое вещество с развитой керогеновой пористостью. Скорее всего, такое различие подтверждает разную природу керогена. При этом

полученные данные могут быть учтены при интерпретации результатов пироллиза образцов пород БВУФ, а методология рекомендована для проверки результатов, полученных общепринятыми методами исследования.

Представительным методом оценки порового пространства, взаиморасположения породообразующих минералов и ОВ и является растровая электронная микроскопия (SEM). На рис. 12 представлено FIB-SEM изображение аншлифа образца породы БВУФ. Такой метод подразумевает послойную резку образца, специально подготовленного для электронно-микроскопического исследования, посредством фокусированного ионного пучка. Отметим, что выявлено несколько зон с наличием ОВ, в одной из которых присутствует относительно равномерная пористость, а в другой — поровое пространство приурочено к границе с минеральной матрицей. Такие различия в структуре вещества в одном микрообразце явно свидетельствуют о различиях вещественного состава керогена.

**Закключение.** В настоящее время исследователи баженовской высокоуглеродистой формации не приняли единую геологическую модель строения отложений, что приводит к постановке ряда задач по ее изучению, среди которых одна из важнейших — изучение органического вещества. Нами представлены данные о наличии в отложениях БВУФ органического вещества разной степени преобразованности и в разных пространственных взаимоотношениях. Одним из решений поставленной проблемы может быть переход исследований на микроуровень. При наличии точных представлений о структуре порового пространства и состоянии ОВ возможна дальнейшая интеграция данных для принятия правильной модели строения

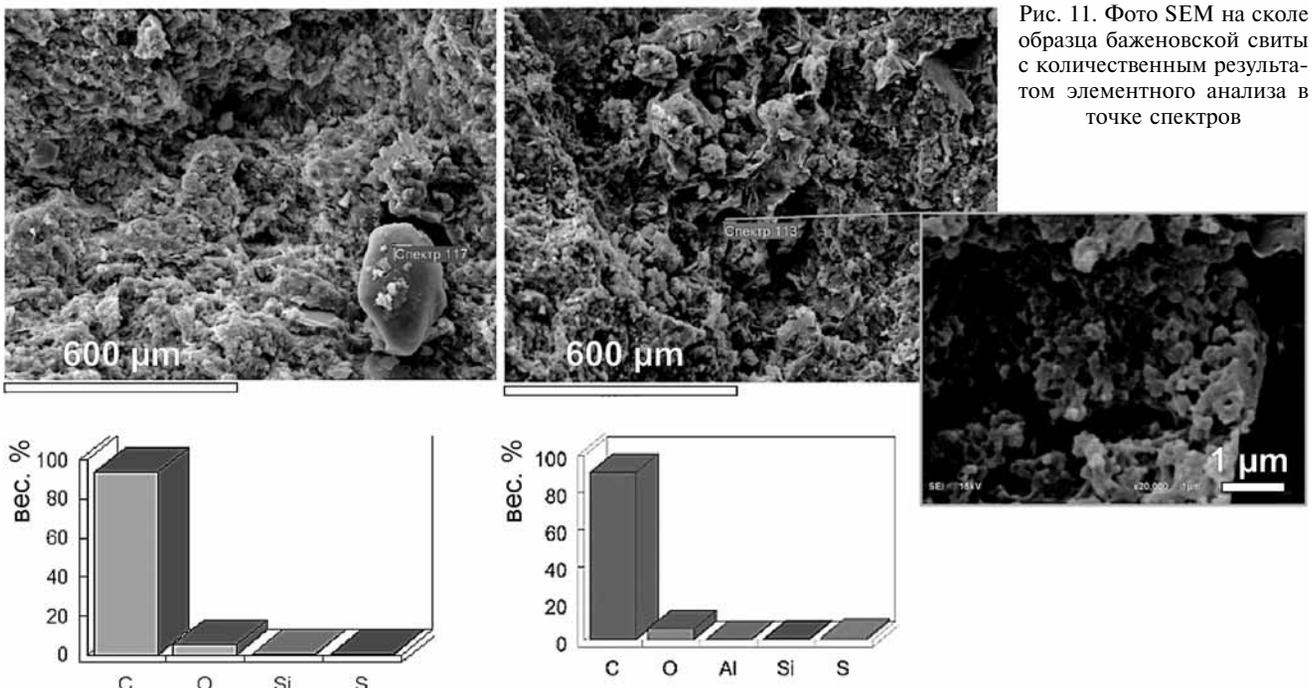


Рис. 11. Фото SEM на сколе образца баженовской свиты с количественным результатом элементного анализа в точке спектров



Рис. 12. FIB-SEM изображение образца породы баженовской свиты

отложений высокоуглеродистой формации. Данные исследований, представленных в статье, могут служить началом масштабного исследования, по-

зволюющего выявлять, изучать и прогнозировать преобразованность как каждого породообразующего компонента отдельно, так и минерально-компонентной ассоциации пород БВУФ, а также определять некоторые поисковые критерии формирования нетрадиционных коллекторов в нефте-материнских толщах. В дальнейшем необходимо будет также провести комплексирование полученных результатов с петрофизическими и литологическими исследованиями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас «Геология и нефтегазоносность Ханты-мансийского автономного округа» // Государственное предприятие ХМАО «НАЦРН имени В.И. Шпильмана». Ханты-Мансийск, 2004.

Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа / Под ред. Б.А. Соколова: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 384 с.

Баталин О.Ю., Вафина Н.Г. Формы захвата свободных углеводородов керогеном // Междунар. журн. Прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10. С. 418–425.

Брадучан Ю.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А. и др., Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность). Новосибирск: Наука, 1986. 216 с.

Брехуницев А.М., Нестеров И.И. Нефть битуминозных глинистых, кремнисто-глинистых и карбонатно-кремнисто-глинистых пород // Вестн. ЦКР Роснедра. 2010. № 6. С. 3–16.

Васильев А.Л., Пичкур Е.Б., Михуткин А.А. и др. Исследования морфологии пустотного пространства керогена баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 28–31.

Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности / Под ред. Ф.Г. Гурари. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1982.

Дорофеева Т.В., Лебедев Б.А., Петрова Т.В. Особенности формирования коллекторских свойств баженовской свиты Салымского месторождения // Геология нефти и газа. 1979. № 9. С. 20–23.

Захаров В.А. Условия формирования волжско-бериасской высокоуглеродистой баженовской свиты Западной Сибири по данным палеоэкологии // Эволюция биосферы и биоразнообразия: Сб. к 70-летию А.Ю. Розанова М.: Тов-во науч. изданий КМК, 2006. С. 552–568.

Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтеносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: Автореф. докт. дисс. М., 2016.

Калмыков Г.А., Балушкина Н.С. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. М.: ГЕОС, 2017. 246 с.

Козлова Е.В., Калмыков Г.А., Ганичев Д.И., Балушкина Н.С. Формы нахождения углеводородов в породах баженовской свиты // Геофизика. 2015. № 3. С. 15–22.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В. и др. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 972–1012.

Панченко И.В., Балушкина Н.С., Барабошкин Е.Ю. и др. Комплексы палеобиоты в абалакско-баженовских отложениях центральной части Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 10, № 2. С. 1–29.

Решение 6-го Межвед. стратигр. совещ. по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири (Новосибирск, 2003 г.). Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. 114 с.

Lui D.H., Shi J.C. Evaluation of early Paleozoic carbonate source rocks // Natural Gas Industry. 1994. Vol. 14. N 6. P. 32–36.

Pickel W., Kus J., Flores D. et al. ICCP. Classification of Liptinite — ICCP System 1994 // Internat. J. Coal Geology. 2017. Vol. 169. P. 40–61.

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации

УДК 553.983

Ю.А. Карпов<sup>1</sup>, Н.С. Балущкина<sup>2</sup>, А.В. Ступакова<sup>3</sup>, М.М. Фомина<sup>4</sup>,  
М.С. Топчий<sup>5</sup>, А.А. Мифтахова<sup>6</sup>, А.Г. Калмыков<sup>7</sup>, Г.А. Калмыков<sup>8</sup>

## КРИТЕРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТИВНЫХ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ФОРМАЦИИ С РАЗВИТОЙ СИСТЕМОЙ ПОРОВОЙ ЕМКОСТИ В КЕРОГЕНЕ

Выполнен анализ зональности катагенетической преобразованности органического вещества отложений баженовской высокоуглеродистой формации в связи с развитием системы поровой емкости в ее собственном органическом веществе. На основе исследований сформулированы региональные поисковые критерии залежей нефти в коллекторах, связанных с пористостью органического вещества в баженовской высокоуглеродистой формации.

*Ключевые слова:* баженовская формация, катагенез, органическая пористость, пористость в керогене, органическое вещество, нетрадиционные коллекторы нефти и газа.

The analysis of Bazhenov high-carbon formation organic matter catagenesis zonal distribution in connection with its own reservoir's organic matter porosity made in this work. Realized research helped to articulate regional prospecting criteria for oil deposits in Bazhenov's formation unconventional reservoir with organic porosity.

*Key words:* Bazhenov Formation, catagenesis, organic porosity, porosity in kerogen, organic matter, unconventional oil and gas reservoirs.

**Введение.** Баженовская высокоуглеродистая формация (БВУФ) — пример высокоуглеродистых отложений, перспективных для добычи нефти. В состав БВУФ входят баженовская свита (БС), тутлеймская, мулымьинская и частично янов-станская свиты. Несмотря на то что изучение БС и ее стратиграфических аналогов продолжается уже более полувека, до сих пор не установлены надежные критерии прогноза их промышленной нефтеносности. В настоящее время, согласно протоколам государственной комиссии по запасам (ГКЗ) на государственном балансе, стоит 93 месторождения с промышленными запасами нефти в БВУФ [Brekhuntsov et al., 2011]. Большинство открытых месторождений приурочено к бортовым зонам Фроловской мегавпадины и примыкающим к ней структурам: Красноленинскому, Сургутскому сводам и Салымскому мегавалу (рис. 1). Такое неравномерное распределение месторождений на

территории бассейна указывает на существование региональных факторов, влияющих на формирование промышленной нефтеносности БВУФ. Эти факторы неоднократно сформулированы в научной литературе, научно-исследовательских и производственных отчетах. В целом они сводятся к следующему:

1) в высокоуглеродистых отложениях продуктивные участки приурочены к зонам повышенных значений пластовой температуры ( $T_{пл} > 100$  °С) [Добрынин, Мартынов, 1979; Дорофеева и др., 1979; Зарипов и др., 1982; Зубков и др., 1984; Зубков, 2016] и характеризуются повышенными значениями пластового давления ( $P_{пл}$ ), с значениями коэффициента аномально высокого пластового давления (АВПД) до 1,8–2,2 [Гурари и др. 1974, 1988; Микуленко, 1974; Нестеров, 1979; Добрынин, Мартынов, 1979; Дорофеева и др., 1979; Зарипов и др., 1982; Зубков и др., 1984; Зубков, 2016];

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* y.a.karpov@yandex.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail:* nataliabalushkina@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, профессор; *e-mail:* a.stoupakova@oilmsu.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* fomina-msu@mail.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* m.s.topchiy@gmail.com

<sup>6</sup> Фонд «Национальное интеллектуальное развитие», вед. инженер; *e-mail:* adeliampft@gmail.com

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

<sup>8</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых; профессор; *e-mail:* gera64@mail.ru

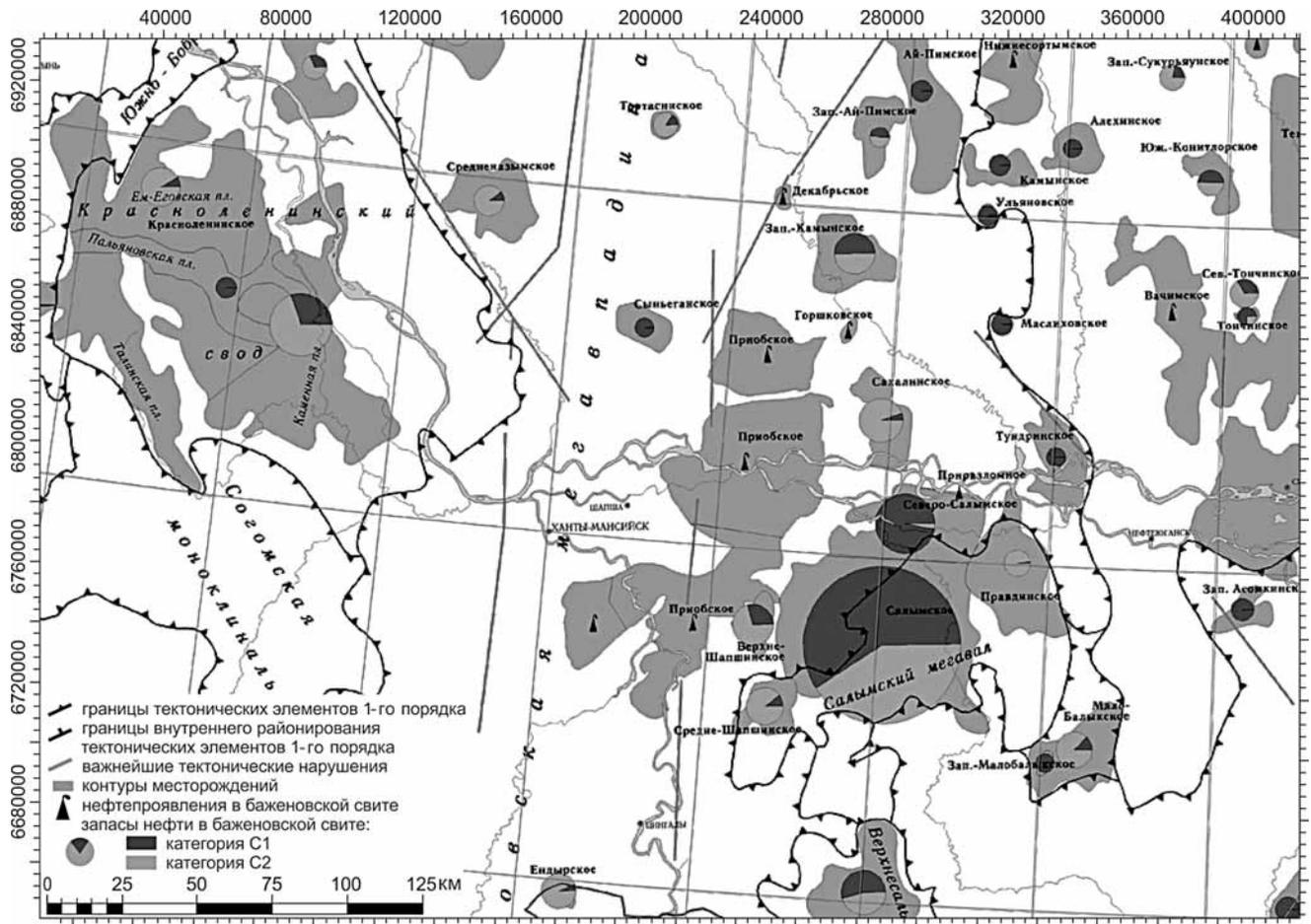


Рис. 1. Фрагмент карты размещения скоплений нефти в баженовской свите на территории Западно-Сибирской НПП, по [Карта..., 2009]

2) повышенное содержание органического вещества (ОВ) в отложениях на продуктивных участках приводит к повышенным значениям кажущегося сопротивления по данным геофизических исследований скважин (ГИС) [Гурари, 1974, Гурари, и др., 1988; Микуленко, 1974; Нестеров, 1979; Добрынин, Мартынов, 1979; Дорофеева и др., 1979; Зарипов и др., 1982; Зубков, 2016];

3) для сохранения образующихся в высокоуглеродистых отложениях залежей углеводородов (УВ) необходимо ограничение резервуара БВУФ сверху и снизу флюидоупорами, способными выдержать повышенное пластовое давление [Микуленко, 1974; Добрынин, Мартынов, 1979; Зарипов и др., 1982; Дорофеева и др., 1979, 1983; Гурари и др., 1988; Зубков, 2016]. Большинство авторов принимают критическую мощность подстилающих и перекрывающих флюидоупоров не менее 10 м [Дорофеева и др., 1979; Зубков и др., 1984; Мелик-Пашаев, 1979; Ефремов и др., 1988; Гурари и др., 1988]. Толщина флюидоупора на некоторых участках не превышает 5–10 м, и нередко эти участки совпадают с участками уменьшения мощности БС;

4) повышенная пластовая температура вызывает усиленную нефтегазогенерацию, а рост пластового давления, вытеснение поровой воды

и заполнение освобожденного пространства УВ приводит к увеличению значений кажущегося сопротивления [Зубков, 2016]. Таким образом, между повышенной  $T_{пл}$  с высокими значениями  $P_{пл}$ , увеличением значений кажущегося сопротивления и удельной генерации УВ, по мнению большинства авторов, наблюдается пространственная связь [Микуленко и др., 1974; Дорофеева и др., 1979, 1983; Зарипов и др., 1982; Гурари и др., 1988; Зубков, 2016]. Они сходятся во мнении о том, что чем сильнее увеличение мощности высокоуглеродистых отложений вместе с увеличением в них концентрации ОВ, тем выше перспективы этих отложений на рассматриваемых участках [Дорофеева и др., 1979; Зарипов и др., 1982; Гурари и др., 1988; Зубков, 2016].

Многолетняя история поисково-разведочных работ и разработки БВУФ показала, что для залежей подвижной нефти в БВУФ характерны малая эффективная мощность естественных коллекторов; отсутствие подстилающих и контурных вод, невыдержанное и слабо прогнозируемое распространение по латерали и разрезу. Залежи нефти практически не связаны со структурным планом, контуры залежей подвижной нефти довольно условны и фактически контролируются наличием

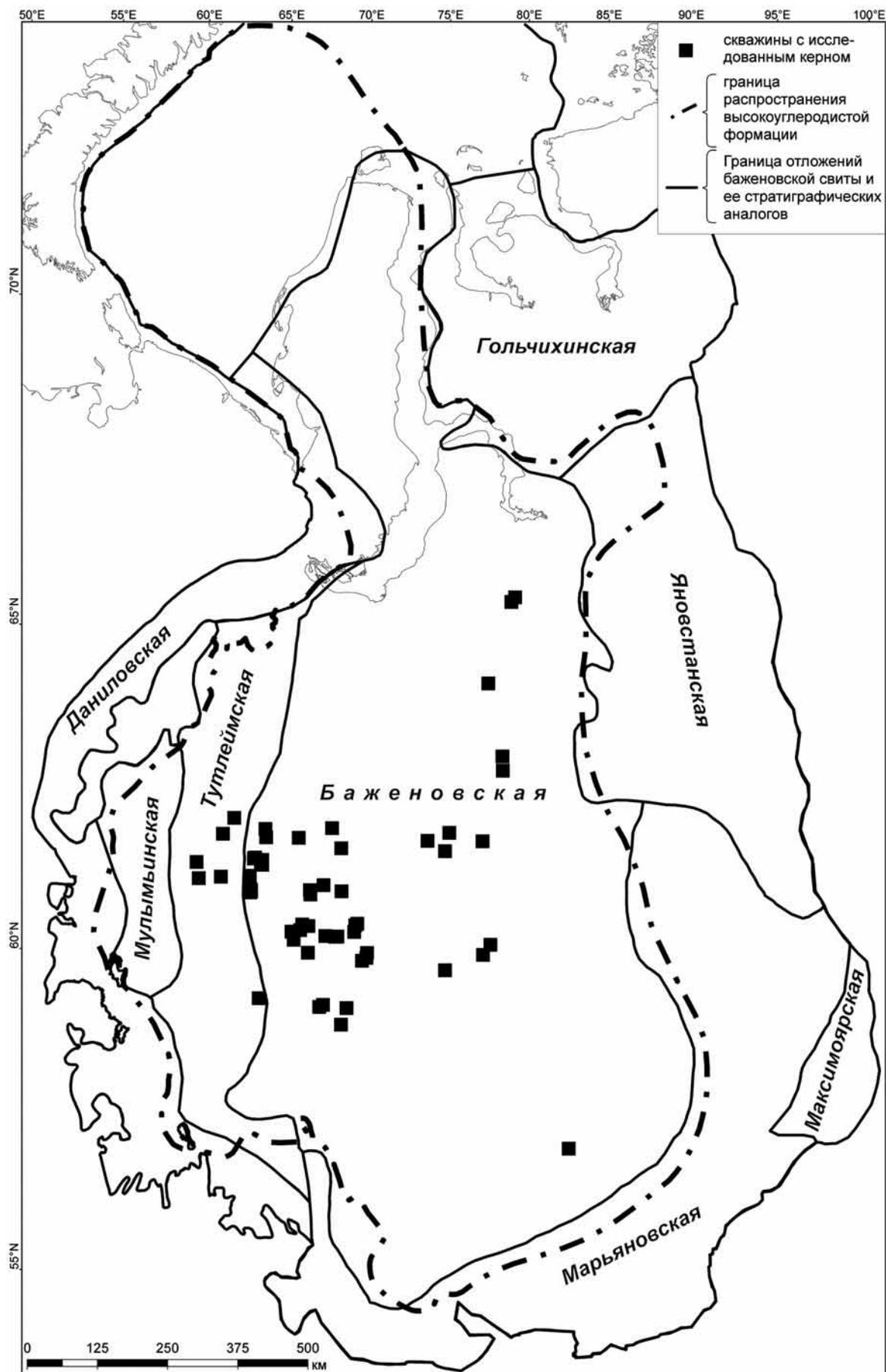


Рис. 2. Карта распространения баженовской свиты и ее стратиграфических аналогов с нанесенной границей БВУФ и скважинами, в которых проводили исследования кернового материала

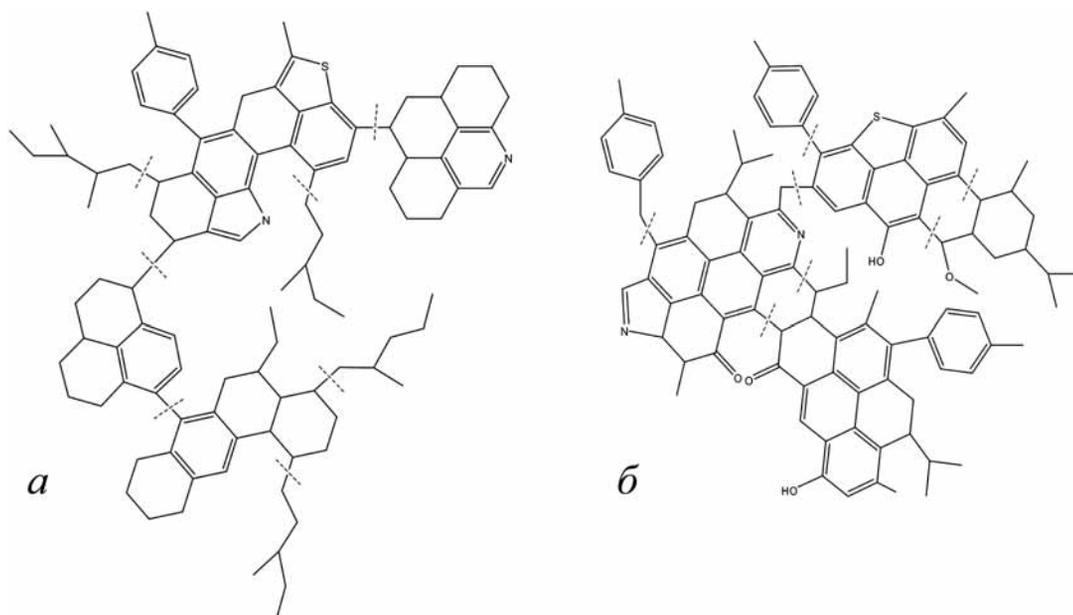


Рис. 3. Реконструкции фрагментов молекул керогена на разных стадиях катагенеза. Степень преобразования: *a* — МК2; *б* — МК4, по [Калмыков, Балушкина, 2017]

или отсутствием естественного коллектора. Это выражается в частом соседстве высокопродуктивных и сухих скважин даже на соседних участках одного и того же месторождения, которое отвечает региональным факторам, благоприятным для формирования промышленной нефтеносности, т.е. даже для конкретной территории в пределах высокоперспективной зоны необходимо выявлять и картировать зоны развития естественных коллекторов как на глубине, так и по площади.

Таким образом, можно сделать вывод, что прогноз нефтеносности БВУФ должен быть основан на региональном и локальном прогнозе зон развития естественных коллекторов, содержащих подвижную нефть в поровом пространстве. В работе Г.А. Калмыкова и Н.С. Балушкиной [2017] описаны виды естественных коллекторов, различающихся по типу порового пространства. Под естественным коллектором будем понимать породы, способные отдавать нефть в скважину без специальных геолого-технологических мероприятий (ГТМ). Очевидно, что каждый тип естественного коллектора требует индивидуального прогноза. Рассмотрим факторы, благоприятные для формирования коллекторской емкости пород БВУФ за счет образования порового пространства непосредственно в ОВ.

**Территория исследования, база данных фактического материала.** Территория исследования охватывает область распространения БС и ее аналогов, обладающих общим признаком — наличием аквагенного концентрированного ОВ. Согласно Н.Б. Вассоевичу, граница между рассеянным ОВ и концентрированным ОВ проводится условно на уровне 2,5% [Баженова и др., 2000]. Объект исследования определен как баженовская высокоуглеродистая формация (БВУФ) (рис. 2). Территория исследований охватывает площадь более 1 млн км<sup>2</sup>. База данных использованного нами фактического материала включает в себя результаты

исследования кернового материала из 52 опорных скважин, исследованных на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; около 170 региональных сейсмических профилей 2D; около 1500 локальных сейсмических профилей 2D; 30 сейсмических кубов 3D; данные комплекса ГИС по более чем 600 скважинам; замеры пластовой температуры и величины теплового потока [Pollack et al., 1993] в более чем 2000 скважин.

**Методы исследования.** Исследование пород БВУФ охватывает широкий спектр макроскопических и микроскопических методов изучения керна из опорных скважин геохимическими и петрофизическими методами, интерпретацию данных ГИС и сейсморазведки. Построение схемы катагенеза ОВ БВУФ осуществлялось при помощи программного обеспечения Petrel 2016 компании «Schlumberger».

**Результаты исследований и их обсуждение.** В БВУФ скопления нефти образуются за счет преобразования собственного ОВ — одного из основных компонентов слагающих ее пород. Если в традиционных терригенных резервуарах ОВ представлено свободной подвижной нефтью, мигрировавшей из нефтематеринских отложений, то в БВУФ присутствуют одновременно кероген, сорбированные углеводородные соединения, физически связанные с керогеном или минеральной матрицей, а также свободные углеводородные соединения, образующие скопления подвижной нефти.

Из данных предыдущих исследований известно, что структура аморфного керогена значительно изменяется в процессе катагенетических деформаций (рис. 3). В процессе катагенеза изменения керогена связаны с уменьшением содержания в нем водорода и отношения Н:С вследствие образования жидких и газообразных углеводородов. Структура керогена в процессе термического

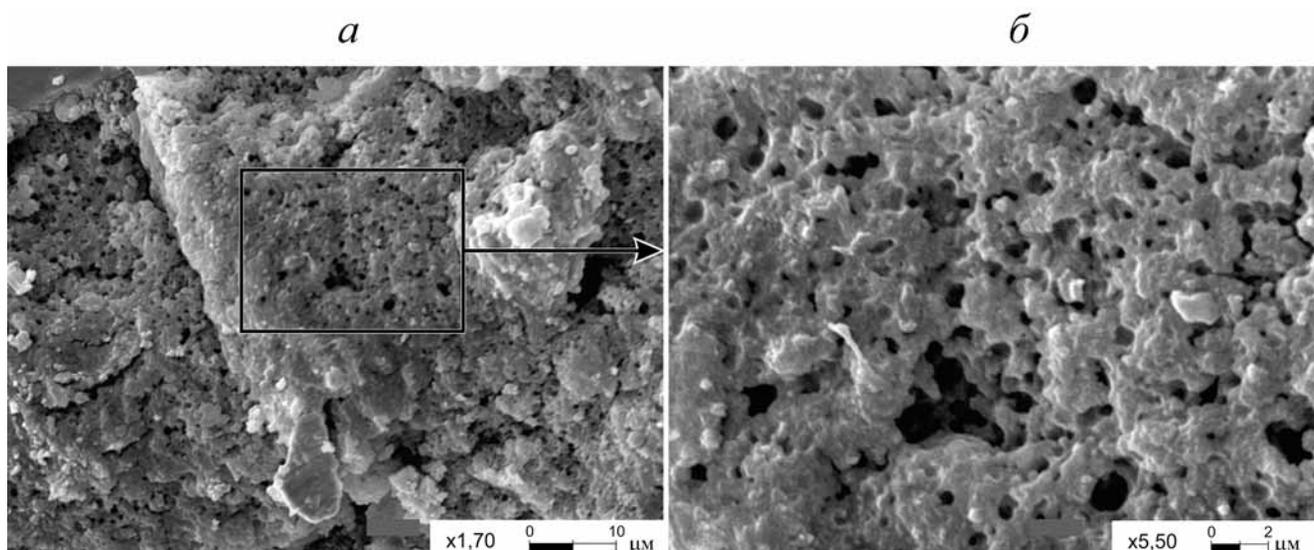


Рис. 4. Поровое пространство керогена пород БВУФ, снятое под растровым электронным микроскопом, по [Калмыков, Балущкина, 2017]

преобразования становится более конденсированной за счет удаления неконденсированных звеньев (алифатических цепей, насыщенных или ароматических циклов). Вследствие усиления конденсации молекулярная структура керогена, полностью отдавшего «жидкую» часть, становится более упорядоченной и занимает меньший объем по сравнению с керогеном, сохранившим генерационный потенциал.

Этот процесс сопровождается образованием непосредственно в керогене породы пор округлой и овальной формы — органической пористости (органопористости) (рис. 4), которая в западной литературе получила название «organic porosity» или «kerogen porosity» [Curtis et al, 2012]. Наши исследования показали, что размер пор в керогене на 4-й стадии мезокатагенеза (МК4) не превышает 2 мкм, что сопоставимо с размерами молекул углеводородов нефтяного ряда, где длина связей С—С в насыщенных углеводородах составляет приблизительно 0,154 нм, для С—Н — 0,109 нм [Behar, Vandenbroucke, 1987].

Исследование трехмерной структуры выявленного порового пространства с использованием метода микротомографии показало, что в коллекторах с органопористостью трещины отсутствуют, а поры приурочены не к глинистым слойкам, а непосредственно к сообщающимся микролинзам бесструктурного ОВ (рис. 5, а, б). Наименее плотные участки на рентгеновских срезах — кероген и поры, заполненные нефтью. Они имеют вытянутую форму, образуя протяженные прослои или отдельные уплощенные линзы, которые подчеркивают ламинарную слоистость пород.

Трехмерная реконструкция участка пористого керогена выполнена по результатам исследований методом растровой электронной микроскопии образца после воздействия на него фокусированного ионного пучка (ФИП-РЭМ). На рис. 6 пред-

ставлена трехмерная реконструкция пустотного пространства, которая позволила оценить степень сообщаемости пор между собой. Анализ показал, что в рассмотренном объеме содержится 92% сообщающихся пор [Васильев и др., 2015]. Расчет общей пористости образца с учетом пористости керогена и пористости минеральной составляющей соответствует коэффициенту пористости ( $K_p$ ), равному 6,2%, измеренному на цилиндре размером 30×30 мм. Размеры пор в керогене и их сообщаемость между собой свидетельствуют о том, что пористость керогена — основная часть общей пористости пород БВУФ.

Главная предпосылка появления органопористости заключается в катагенетическом преобразовании ОВ. Поры в керогене достигают максимальных размеров и сообщаемости на стадиях катагенеза МК3—МК4. Керогеновая пористость прямо взаимосвязана с концентрацией ОВ в породах (рис. 7).

Однако значительных для баженовской свиты величин (до 10%) такая пористость достигает только в относительно высокоглинистых породах нижнего интервала свиты. В верхнем интервале свиты значения пористости в одноименных высокоглинистых породах на одной и той же стадии катагенеза не превышают 2%. Такое снижение пористости, возможно, стало следствием бактериальной переработки ОВ и пиритизации порового пространства. На рис. 5 приведены плотностное рентгеновское сечение (рис. 5, в) и объемная реконструкция порового пространства (рис. 5, г) образца высокоглинистой тонкослоистой породы, пористость которого составляет 2,47%, тогда как средняя пористость пород в разрезе этой скважины превышает 6%. Поровое пространство этого образца в значительной степени заполнено пиритом, который отчетливо выделяется на рентгеновском срезе (рис. 5, в) ярким белым цветом.

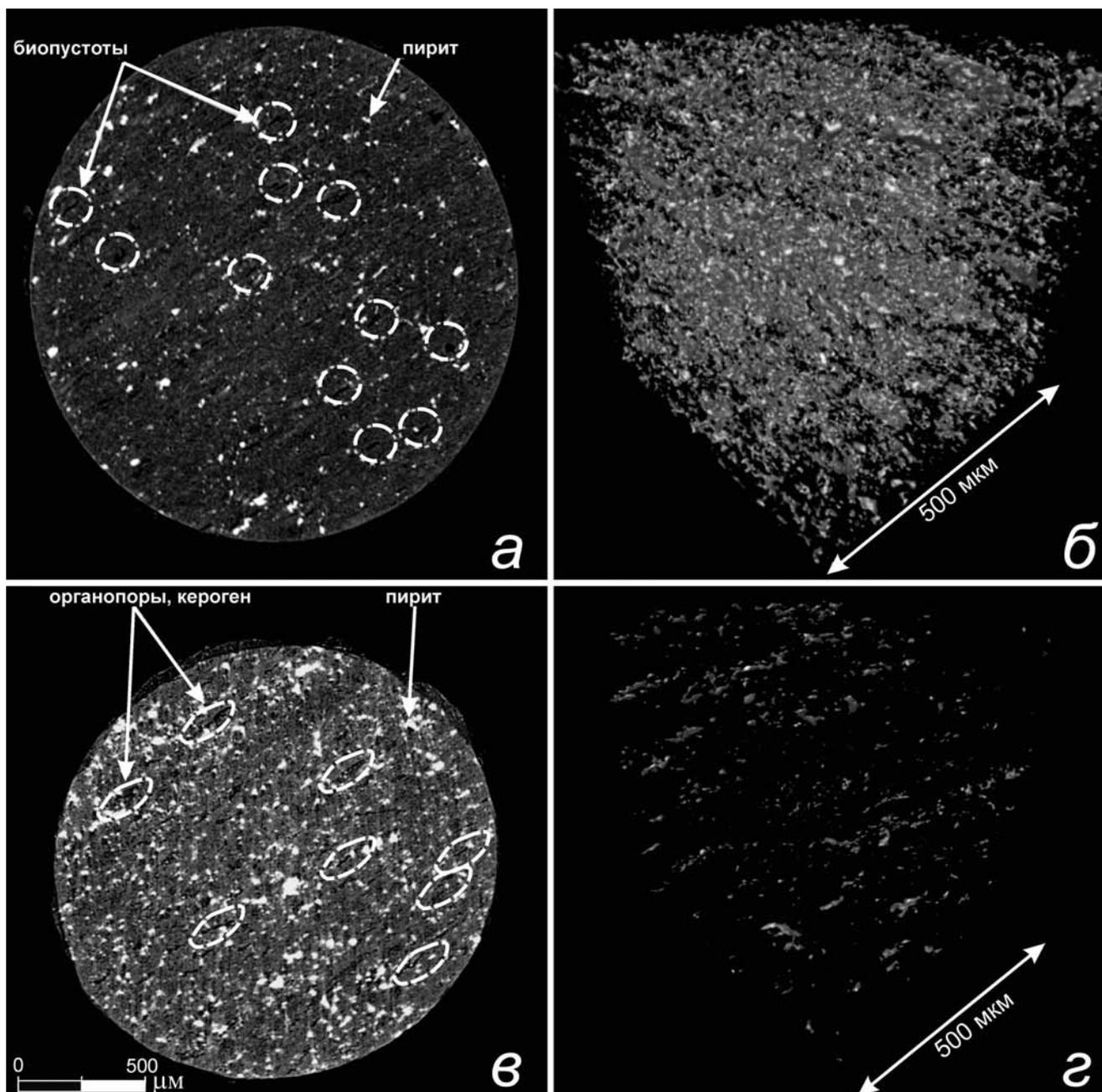


Рис. 5. Плотностное рентгеновское сечение образца глинисто-кремнистой породы с пористостью 9,45% (а) и трехмерная реконструкция пустотного пространства образца глинисто-кремнистой породы с пористостью 9,45% образца породы, показывающая приуроченность пор к микролинзам бесструктурного ОВ и отсутствие трещин (б); плотностное рентгеновское сечение интенсивно пиритизированного образца (в) и модель порового пространства интенсивно пиритизированного образца (г), по [Калмыков, Балушкина, 2017]

Процессы пиритизации порового пространства выявлены в основном в верхнем интервале свиты, в котором концентрация ОВ почти в 2 раза выше по сравнению с таковой в нижнем интервале и достигает 25%. На рис. 8 представлен геолого-геофизический планшет одной из скважин Салымского месторождения. Здесь в нижних интервалах концентрация ОВ не превышает 10–12%, однако пористость достигает 10%. Прочный карбонатно-кремнистый каркас пород в нижних интервалах разрезов играет важную роль в формировании емкости керогена, предотвращая закрытие пор под влиянием горного давления.

Анализ результатов определения значений коэффициентов пористости и концентрации ОВ (данные измерений массовой доли органического углерода (total organic carbon, — ТОС) показывает, что пористость со значениями >3% приурочена к пластам с относительно пониженной концентрацией ТОС. Пласты же с высокой долей ТОС (на рис. 8 — пласты с подошвой на глубине 2877,8 м и на глубине 2883–2889 м по измерениям ГИС) обладают низкой пористостью.

Наличие поровой емкости в керогене в породах на высоких стадиях катагенеза подтверждается не только высокой пористостью, которую можно

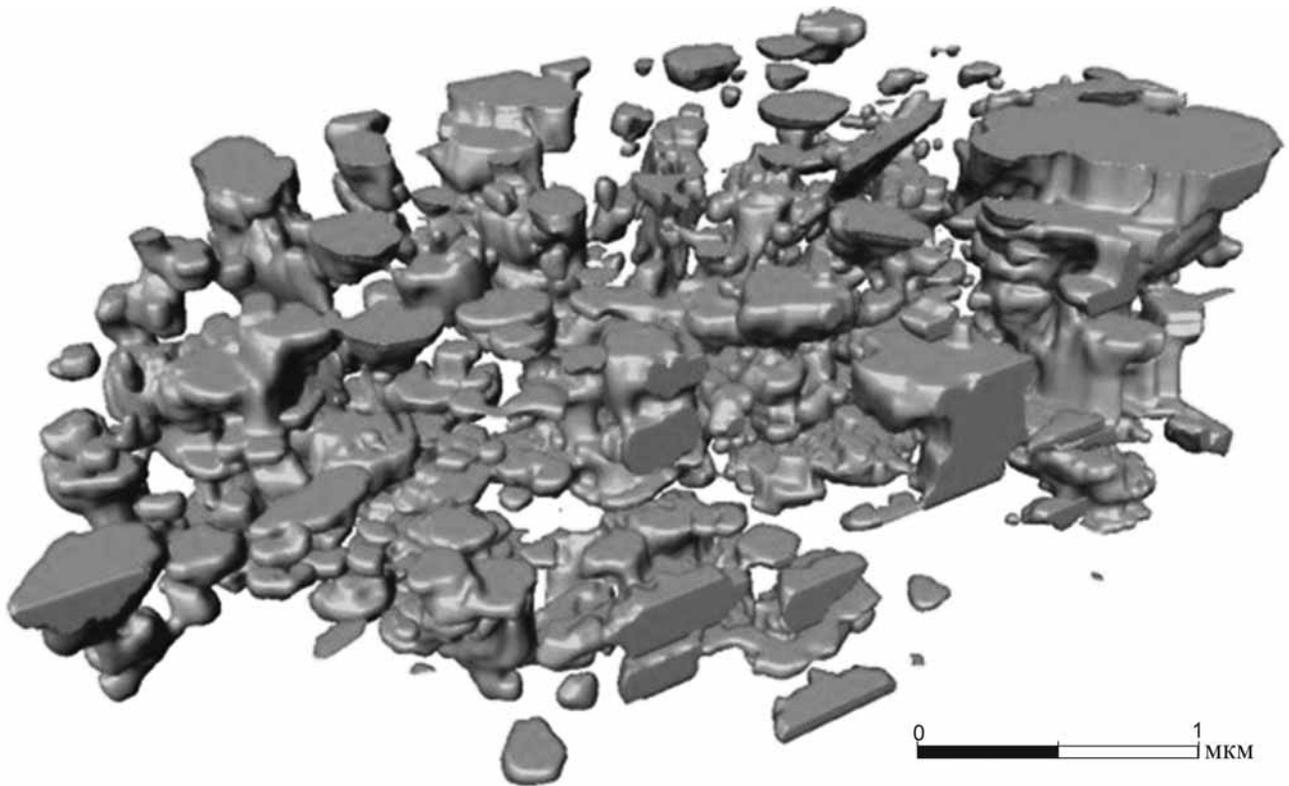


Рис. 6. Трехмерная реконструкция участка пористого керогена, выполненная по результатам исследования образца породы методом ФИП-РЭМ, позволяющая рассчитать степень сообщаемости пор между собой, по [Васильев и др., 2015]

измерить и исследовать на образцах керна, но и доказанной продуктивностью скважин, в которых процессы формирования вторичной органопористости получили широкое развитие [Калмыков, Балушкина, 2017].

Таким образом, для пород БВУФ с поровой емкостью в матрице пород, сформированной за счет пор в керогене, характерны следующие особенности:

1) высокая степень катагенетической преобразованности, отвечающая градации МКЗ, при которой поры в керогене достигают достаточных размеров и сообщаемости для формирования коллектора;

2) приуроченность коллекторов к тем пластам в разрезе БВУФ, где концентрация ТОС не превышает 10–13%;

3) низкая степень пиритизации порового пространства ОВ;

4) наличие в породе достаточного количества кремнистых и карбонатных минералов, создающих прочный каркас и предотвращающих закрытие пор в керогене под влиянием горного давления.

Все перечисленные особенности можно использовать для выявления и картирования залежей в БВУФ, формирование которых связано с наличием в породах керогеновой пористости. На региональном уровне выявление высокоперспективных зон сводится к поиску участков со степенью катагенеза ОВ БВУФ на уровне МКЗ и выше.

В работах А.Э. Конторовича с соавторами [Конторович и др., 2009; Фомин, 2011] установлена общая закономерность усиления зрелости ОВ от периферии к центральным районам Западной Сибири и по направлению с юга на север. Эта закономерность обусловлена в первую очередь погружением отложений юрского возраста в указанных направлениях. На окраинах Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (НГБ) отложения юрского периода в процессе дальнейшей истории развития не погружались на значительную глубину в зоны высокой температуры и давления, поэтому ОВ преобразовано слабо (ПКЗ–МК1). По направлению к центральным районам и с юга на север катагенез постепенно нарастает (градации

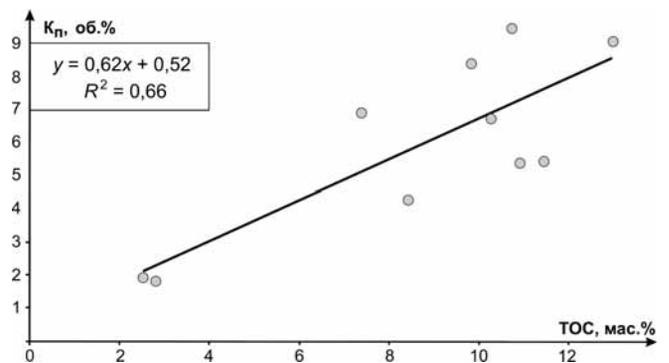


Рис. 7. Увеличение динамической пористости ( $K_n$ , %об.) породы при увеличении доли керогена (ТОС) для пород, находящихся на стадии катагенеза МКЗ

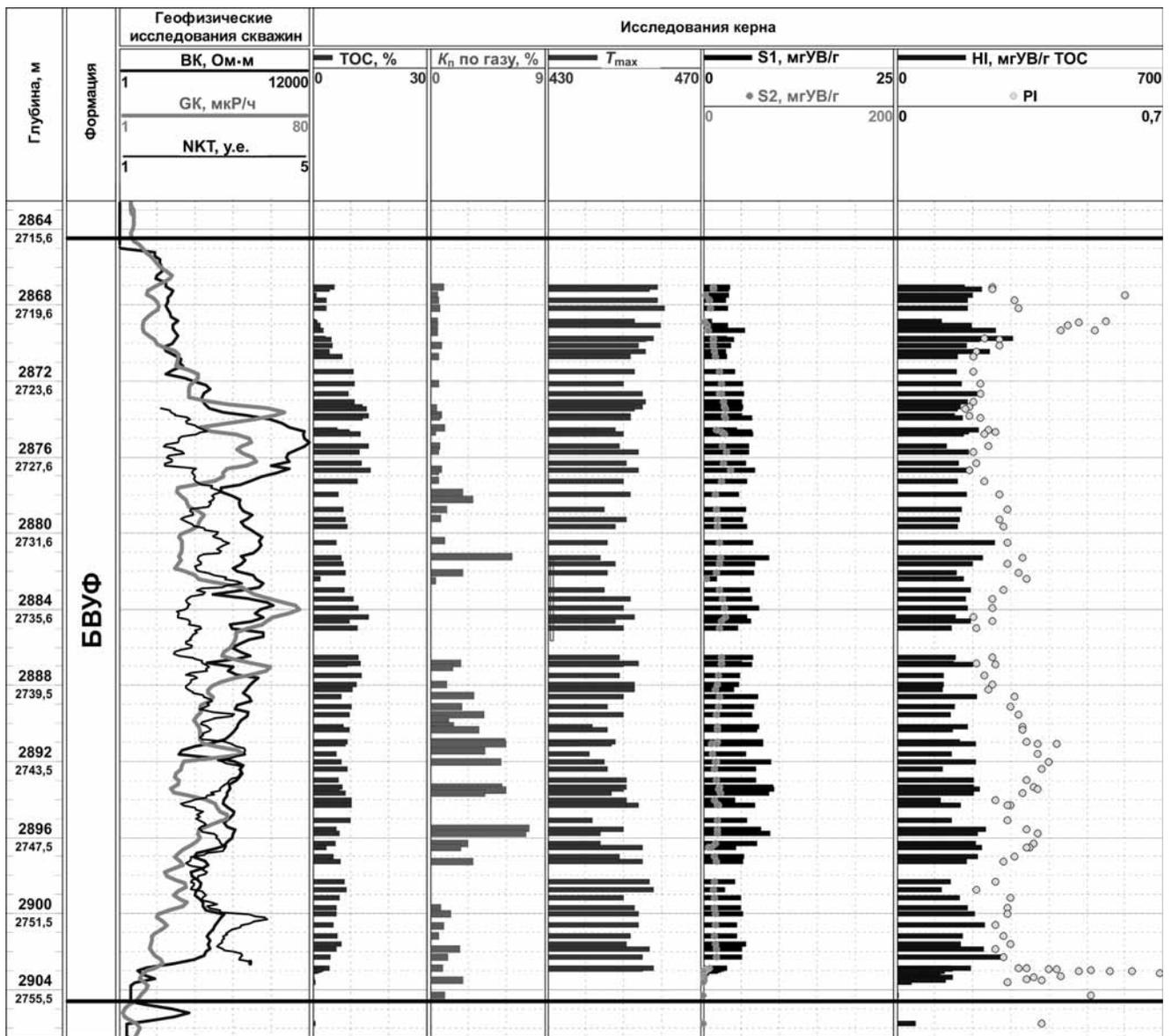


Рис. 8. Геолого-геофизический планшет одной из скважин Салымского месторождения: ТОС — общее содержание  $C_{орг}$  (масс. %);  $K_n$  по газу — пористость, измеренная до экстракции образцов газовольюметрическим методом;  $T_{max}$  — температура максимального выхода УВ при деструкции керогена; S1 — массовое количество УВ, выходящих при пиролизе породы до температуры 300 °С; S2 — массовое количество УВ, выходящих при пиролизе породы в диапазоне 300–600 °С; HI=S2 · 100/ТОС; PI=S1/(S1+S2)

катагенеза МК1–МК2) и достигает максимума (АК1) для юрских отложений, территориально расположенных в акватории Карского моря [Фомин, 2011], где отложения погружались на значительную глубину в зону жестких термобарических условий. В целом, по определению А.Э. Конторовича с соавторами [Конторович и др., 2009], уровень зрелости ОВ юрских отложений Западно-Сибирского НГБ определяется глубиной погружения осадочных толщ, и, соответственно, максимальной температурой, воздействию которой подвергались юрские породы.

Нами были использованы региональные схемы катагенеза ОВ юрских отложений, построенные А.Н. Фоминым [2011], которые были дополнены данными, имеющимися в распоряжении кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

(рис. 9). В результате значительно изменилась конфигурация зон повышенного катагенеза в районе Салымского мегавала и Краснотенинского свода (рис. 10). Совместный анализ карт катагенеза и структурных поверхностей кровли БВУФ показал, что (кроме регионального тренда увеличения стадии катагенеза с увеличением глубины залегания кровли юрских отложений) существуют локальные аномальные зоны повышенных стадий катагенеза.

В центральных районах бассейна, где сосредоточены основные месторождения нефти (рис. 1), при приблизительно одинаковой глубине залегания (от 2500 м до 3000 м) и мощности (от 25 до 40 м) баженовских отложений уровень катагенеза на соседних площадях может отличаться на две и даже на три градации (изменяться от МК1 до МК4). Вероятным объяснением такого явления может служить возрастание теплового потока в зонах

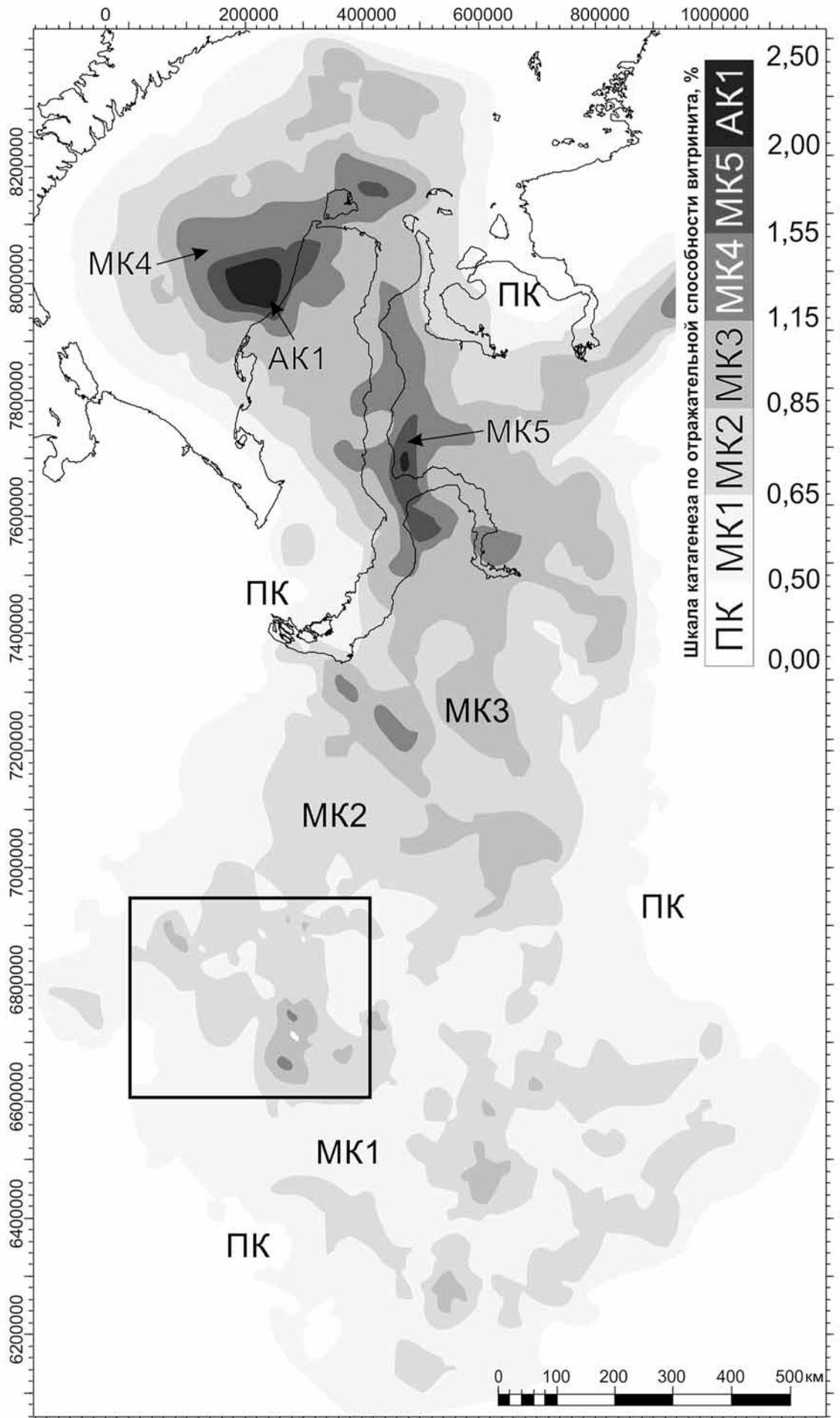


Рис. 9. Дополненная новыми данными схема катагенеза ОВ, по [Фомин, 2011], в кровле верхнеюрских отложений Западной Сибири. Прямоугольником окомурен участок, представленный на рис. 10 и 11

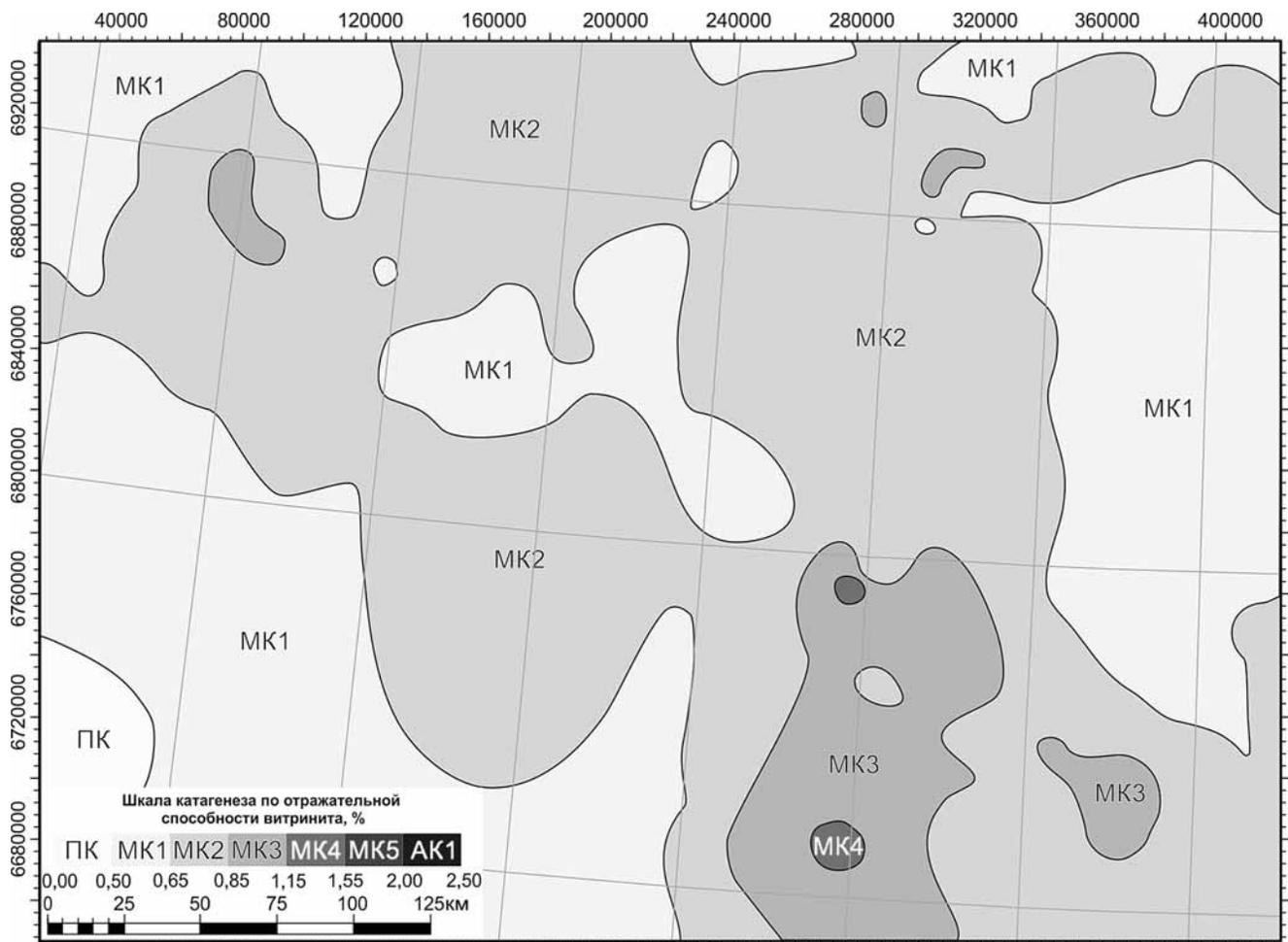


Рис. 10. Схема катагенеза ОВ в кровле верхнеюрских отложений в районе Салымского мегавала и Красноленинского свода

глубинных разломов и на границах магматических тел в подстилающих осадочный чехол палеозойских и триасовых толщах. По данным А.Э. Конторовича с соавторами [Конторович и др., 2009], в большинстве случаев над магматическими массивами отмечаются повышенный тепловой поток и геотермический градиент (4,0–5,0 °С/100 м, а на остальной территории обычно 2,5–3,0 °С/100 м), что отражается в дополнительном прогреве пород осадочного чехла.

На рис. 11 приведено сопоставление карты катагенеза ОВ, полученной на основании воспроизведения методики построения схемы катагенеза ОВ в кровле верхнеюрских отложений Западной Сибири под редакцией А.Н. Фомина [Фомин,

2011], уточненной по данным, полученным специалистами МГУ имени М.В. Ломоносова (рис. 11, а), и палеогеолого-ландшафтной карты на поздне-триасовое время, созданной под редакцией В.С. Суркова (рис. 11, б) [Атлас..., 1995].

Сопоставление карт показало, что наиболее высокие стадии катагенеза приурочены к расположенным в доюрском основании зонам контактов гранитных массивов с вмещающими толщами. При этом аномальный прогрев БВУФ фиксируется не над каждым гранитным массивом и зоной его контакта с вмещающими толщами. Мы предполагаем, что механизм дополнительного прогрева пород БВУФ мог происходить следующим образом. В зонах контакта гранитных массивов с

Рис. 11. Сопоставление фрагмента карты катагенеза ОВ в кровле верхнеюрских отложений, по [Фомин, 2011], уточненной по данным МГУ (б), и палеогеолого-ландшафтной карты на поздне-триасовое время (а) по [Атлас..., 1995]: 1 — красноцветные и зеленоцветные миндалекаменные лавы базальтового состава с прослоями пестроцветных песчаников, аргиллитов и глин; 2 — темно-серые глины с прослоями песчаников и линзами известняков; 3 — красноцветные песчаники, аргиллиты и глины; 4 — глины, зеленые сланцы, известняки, аргиллиты, песчаники и конгломераты; 5 — песчаники, аргиллиты, конгломераты, известняки, глины, сланцы, экструзивные породы основного и среднего состава; 6 — ортосланцы, мета-аргиллиты, известняки, доломиты и основные экструзивные породы; 7 — гранитовые, гранит-порфириновые и габбро-диоритовые палеозойские интрузии; 8 — габбро, нориты, габбро-нориты, габбро-диабазы и габбро-диоритовые палеозойские и триасовые интрузии; 9 — верхнепалеозойские дуниты, гарцбургиты, перидотиты, пироксениты и серпентиниты; 10 — лавы и туфы основного состава; 11 — разломы; 12 — палеозойские осадочные породы (а — терригенные, б — карбонатные, в — терригенно-карбонатные); 13 — изолинии величины отражательной способности витринита; 14 — границы зон разных градаций катагенеза; 15 — точки замера величины современного теплового потока, мВт/м<sup>2</sup>, по [Pollack et al., 1993]



вмещающими толщами возможно формирование трещиноватости, по которой — при определенных условиях — могут двигаться гидротермальные растворы, привносящие дополнительное тепло в породы осадочного чехла. Косвенным подтверждением этого механизма может служить распределение зон максимального катагенеза на Салымской группе месторождений. Так, на карте максимальная стадия катагенеза (МК4) зафиксирована на западе от гранитного массива, расположенного под Салымской площадью. Контур МК3 в пределах Салымского мегавала проходит в зоне влияния двух гранитных массивов. В монографии Г.А. Калмыкова и Н.С. Балускиной [2017] показано, что наибольшие промышленные притоки из пород БС были приурочены не к сводовой части выступа фундамента, а оконтуривали этот выступ. Так как для Салымской площади доказано, что пористость в керогене дает основной вклад в динамическую пористость, то фиксация стадии катагенеза на уровне МК3 на Красноленинском своде дает основание предполагать, что в этой зоне также будет обнаружен коллектор с керогеновой пористостью. На Красноленинском месторождении получены промышленные притоки нефти из пласта Ю0 и открыто месторождение нефти в отложениях БВУФ.

**Заключение.** Таким образом, установлено, что повышенная катагенетическая преобразованность ОВ, отвечающая концу главной зоны нефтеобразования, представляет собой один из важнейших факторов, повлиявших на формирование нефтеносности БВУФ. Промышленная нефтеотдача пород БВУФ контролируется наличием естественного коллектора. На грациях катагенеза МК3 и выше в породах БВУФ формируется коллектор с поровой емкостью, приуроченной к керогену пород. Характеристики порового пространства керогена позволяют рассматривать его как часть общей пористости пород. Коллекторские интервалы приурочены в основном к нижнему и подошве верхнего интервалов БВУФ, где концентрация ОВ не превышает 10–13%, а степень пиритизации пород не превышает нескольких процентов. На величину пористости положительно влияет наличие в породах-коллекторах прочных кремнистых или карбонатных разностей в составе минерального каркаса, препятствующих закрытию пор под влиянием горного давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас палеотектонических и палеогеологических карт Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (Лист 17 — поздний триас), масштаб: 1:5 000 000 / Под ред. В.С. Суркова. М.: СНИИГГиМС, 1995.

Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа / Под ред. Б.А. Соколова. Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 384 с.

Васильев А.Л., Пичкур Е.Б., Михуткин А.А. и др. Исследования морфологии пустотного пространства

Анализ схемы катагенетической зональности отложений БВУФ показал, что в центральной части бассейна, где сосредоточены основные месторождения нефти, выделяются зоны аномально высокого катагенеза, не связанные с региональными закономерностями погружения отложений. Дополнительный прогрев зарегистрирован над расположенными в складчатом основании гранитными массивами и зонами их контакта с вмещающими породами. Эти факты позволяют сформулировать региональные поисковые критерии залежей нефти в БВУФ, связанные с пористостью в керогене: 1) породы БВУФ должны находиться на стадиях катагенеза МК3 или МК4; 2) в складчатом основании должны быть выявлены гранитные массивы; 3) месторождения будут приурочены к зонам контакта гранитного массива и вмещающих отложений.

Авторы обращают внимание, что здесь речь идет только об одном типе коллектора, связанного с керогеновой пористостью, но продуктивность баженовской свиты может быть связана с коллекторами других генетических типов [Калмыков, Балускина, 2017]. Они требуют отдельного анализа и будут рассмотрены в дальнейшем.

Отметим, что если содержание ОВ в БВУФ достаточно высоко, и оно находится на высоких стадиях катагенетической преобразованности, то минеральный каркас коллектора ослабевает, и поровое пространство коллектора может частично или полностью закрываться. Критическая концентрация ОВ в породах, при которых начинаются процессы закрытия коллектора, составляет 10–13% ТОС. При этом прочный карбонатно-кремнистый скелет породы способен сохранить поры от закрытия.

Именно поэтому в разрезах скважин коллектор с керогеновой пористостью приурочен обычно к нижней подсвите или к самой нижней части верхней подсвиты БВУФ, где концентрация ОВ не превышает критических значений, а в составе пород часто присутствуют кремнистые и карбонатные разности.

Необходимо учитывать не только региональные закономерности, связанные с катагенетической преобразованностью ОВ, но и локальные особенности состава и строения каркаса коллектора пород БВУФ, выделяемые при петрофизических и геохимических исследованиях керна.

керогена баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 28–31.

Гурари Ф.Г., Ваиц Э.Я., Мелневский В.Н. и др. Условия формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты / Под ред. Ф.Г. Гурари. М.: Недра, 1988. 199 с.

Гурари Ф.Г., Гурари И.Ф. Формирование залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1974. № 5. С. 36–40.

*Добрынин В.М., Мартынов В.Г.* Коллектор нефти в нефтематеринских глинистых толщах // Геология нефти и газа. 1979. № 7. С. 36–43.

*Дорофеева Т.В., Лебедев Б.А., Петрова Т.В.* Особенности формирования коллекторских свойств баженовской свиты Салымского месторождения // Геология нефти и газа. 1979. № 9. С. 20–23.

*Дорофеева Т.В., Краснов С.Г., Лебедев* и др. Коллекторы нефти баженовской свиты Западной Сибири. Л.: Недра, 1983. 132 с.

*Ефремов Е.П., Зубков М.Ю., Боркун Ф.Я., Сонич В.П.* Методика оценки перспектив нефтегазоносности баженовских отложений Западной Сибири // Энергия и механизм первичной миграции углеводородов. М.: Наука, 1988. С. 152–161.

*Заринов О.Г., Сонич В.П., Зубков М.Ю.* Региональная перспективность отложений баженовской свиты Западной Сибири // Исследования в области геологии и разработки нефтяных месторождений Западной Сибири. Тюмень: СибНИИИП, 1982. С. 132–144.

*Зубков М.Ю.* Оценка региональных и локальных перспектив нефтеносности баженовской и абалакской свит Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2016. № 3. С. 51–67.

*Зубков М.Ю., Ершов В.А., Прямоносова И.А., Шакирова А.Х.* Генерация битумоидов и формирование емкостного пространства в отложениях баженовской свиты // Научно-технический прогресс при поисках и освоении нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. Вып. 63. Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1984. С. 16–21.

*Калмыков Г.А., Балушкина Н.С.* Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. М.: ГЕОС, 2017. 246 с.

Карта размещения скоплений нефти в баженовской свите на территории Западно-Сибирской НГП, масштаб 1:5 000 000. М., ИГиРГИ, 2009.

*Конторович А.Э., Фомин А.Н., Красавчиков В.О., Истомин А.В.* Катагенез органического вещества в кровле и подошве юрского комплекса Западно-Сибирского мегабассейна // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 11. С. 1191–1200.

*Мелик-Пашаев В.С., Степанов А.И., Терещенко Ю.А.* О природе аномально высоких пластовых давлений в юрских отложениях Салымского месторождения // Геология нефти и газа. 1979. № 7. С. 25–28.

*Микуленко К.И.* Перспективы нефтегазоносности отложений баженовской свиты центральных и южных районов Западно-Сибирской плиты // Науч. тр. СНИИГГиМС. 1974. Вып. 194. С. 37–41.

*Нестеров И.И.* Новый тип коллектора нефти и газа // Геология нефти и газа. 1979. № 10. С. 26–29.

*Фомин А.Н.* Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. 331 с.

*Behar F., Vandenbroucke M.* Chemical modeling of kerogens // Organic Geochem. 1987. Vol. 11, N 1. P. 15–24.

*Brekhushtsov A.M., Monastirev B.V., Nesterov I.I.* Distribution patterns of oil and gas accumulations in West Siberia // Russ. Geol. Geophys. 2011. Vol. 52, Iss. 8. P. 781–791.

*Curtis M.E., Cardott B.J., Sondergeld C.H., Rai C.S.* Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity // Intern. J. Coal Geol. 2012. Vol. 103. P. 26–31.

*Pollack H.N., Hurter S., Johnson* Heat flow from the Earth's Interior: Analysis of the global data set: Rev. Geophys. 1993. Vol. 31. P. 267–280.

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации

УДК 551.340

А.И. Тюрин<sup>1</sup>, В.С. Исаев<sup>2</sup>, Д.О. Сергеев<sup>3</sup>, В.Е. Тумской<sup>4</sup>, Н.Г. Волков<sup>5</sup>,  
И.С. Соколов<sup>6</sup>, О.И. Комаров<sup>7</sup>, А.В. Кошурников<sup>8</sup>, А.Ю. Гунар<sup>9</sup>,  
И.А. Комаров<sup>10</sup>, В.В. Ананьев<sup>11</sup>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках полевой конференции День науки и инноваций на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова опробованы современные инновационные полевые методы инженерно-геокриологических исследований, проведены мастер-классы ведущих специалистов в инженерно-геокриологических изысканиях, осуществлено тестирование измерительной аппаратуры для исследования температурных полей грунтового массива. Показана необходимость включения инновационных элементов в образовательный процесс.

*Ключевые слова:* полевые методы инженерно-геокриологических исследований, метод статического зондирования мерзлых грунтов, термокосы, сезонно-охлаждающие устройства, аэрофотосъемка, лазерное сканирование (LIDAR).

Testing of modern innovation field methods of engineering-geocryological research, master class workout by leading specialists of engineering-geocryological surveys, checking out of measurement equipment for thermal field ground massif researches which were done at "The day of science and innovation" field conference in Zvenigorod biological station of Lomonosov Moscow state university. Necessity of innovation methods usage has approved.

*Key words:* field method of engineering-cryological research, method of static probe research of frost grounds, thermal string, thermal syphon, aerial photography, laser scanning (LIDAR technology).

**Актуальность.** Территория Российской Федерации на сегодняшний день в геокриологическом аспекте за редким исключением представляет собой объект исследования инженеров-геокриологов в связи с распространением многолетнемерзлых и сезонномерзлых пород на большей части ее территории [Балобаев, 1973]. Изменения температурного режима мерзлых пород приводят к оттаиванию грунтов, сопровождающемуся потерей их прочностных свойств, что приводит к техногенным катастрофам [Основы..., 1999]. Сложность строения и нестабильность состояния мерзлого массива ставят перед инженерно-геологической отраслью следующие задачи:

- сбор достоверной, оперативной информации о грунтовом массиве, находящемся в зоне отрицательных значений температуры;
- прогноз состояния мерзлого массива, учитывающего климатический тренд для исследуемого региона и техногенную нагрузку при освоении конкретной территории;
- обоснование палеорекострукции климатических условий формирования мерзлых толщ на изучаемой территории, основывающейся на знании закономерностей формирования криосферы.

При подготовке специалистов для решения поставленных инженерно-геокриологических за-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* tjurin\_alex@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* tpomed@rambler.ru

<sup>3</sup> Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, зав. лаб., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* sergueevdo@mail.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* vtumskoy@rambler.ru

<sup>5</sup> ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», вед. инженер, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* ngv@fugro.ru

<sup>6</sup> ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», инженер; *e-mail:* ssi@fugro.ru

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, науч.с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* msu.geophiz@gmail.com

<sup>8</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* koshurnikov@msu-geophysics.ru

<sup>9</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* gunar@msu-geophysics.ru

<sup>10</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* ilya\_komarov@mail.ru

<sup>11</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского» (ПКУ), канд. техн. н.; *e-mail:* vvanord@yandex.ru

дач кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова проводит практику студентов 4-го курса инженерного потока по программе «Полевые методы геокриологических исследований» [Полевые..., 1986]. Практика проводится на территории Звенигородской биостанции МГУ, где за последние годы созданы площадки комплексного инженерно-геокриологического мониторинга, включающего:

- наблюдения за температурными характеристиками грунтовых массивов разных таксонометрических единиц, выделяемых студентами в ходе микрорайонирования;
- наблюдения за процессом морозного пучения в выделенных микрорайонах;
- инженерное бурение с отбором керна для изучения текстур мерзлого грунта;
- широкий спектр геофизических исследований: электротомография, высокочастотное зондирование (ЧЗ).

Освоение полевых методов инженерно-геокриологических исследований позволяет студентам получать полевые данные инженерно-геокриологических изысканий, составлять прогноз развития криогенных процессов, предлагать наиболее эффективные методы борьбы с криогенными явлениями, отталкиваясь от традиционной методики проведения полевых инженерно-геокриологических исследований.

В связи с меняющимися требованиями к инженерным изысканиям программа практики в 2015 г. была дополнена Днем науки и инноваций, который стал традиционным. В его рамках студентам предоставляется возможность ознакомиться и протестировать новые направления в инженерно-геологических исследованиях, такие, как:

- метод статического зондирования грунтов в приложении к мерзлым грунтам;
- термостабилизация грунта при помощи сезонных охлаждающих устройств (СОУ);
- аэрофотосъемка с применением беспилотных летающих аппаратов (БПЛА);
- 3-мерная топографическая съемка местности с помощью передовой технологии лазерного сканирования (ЛИДАР);
- исследование сезонно-мерзлых грунтов новейшими геофизическими методами и аппаратурой.

Кроме того, проводится тестирование измерительной аппаратуры разных производителей, показывающее их недостатки и преимущества. Это позволяет провести экспертную оценку изыскательского оборудования, что, безусловно, влияет на качество проводимых инженерных работ. В 2017 г. были протестированы температурные косы разных производителей.

Сравнение результатов измерения температуры среды температурными косами разных производителей.

Эксперимент проведен на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова в период с 12:30 23 января по 09:30 24 января 2017 г. В сравнении участвовали:

- 1) термокоса и логгер В.Х. Кирьякова (Россия, ИЗМИРАН);
- 2) термокоса и логгер В.А. Дубровина (Россия, ВСЕГИНГЕО–ИКИ);
- 3) термокоса и логгер компании «GEOPRECISION» (Германия) [<http://www.geoprecision.com/>];
- 4) Термокоса и логгер компании НОВО (США) [<http://www.onset-comp.com/products/data-loggers-sensors/temperature>]

**Постановка эксперимента.** Пять датчиков от каждой термокосы (за исключением косы НОВО, у которой всего 4 датчика) были смотаны поблочно. Размер блока в поперечнике 3–4 см, длина по датчикам около 4 см. Из-за разных размеров датчиков термокос (самые крупные датчики — у кос с № 1, 2) датчики располагали снаружи смотки, а более компактные у кос № 3, 4 помещали внутри смоток. Каждая смотка была зафиксирована изолентой разного цвета, а сверху обмотана 1–2 слоями термопеноизоляции (толщина обмотки около 2 мм) (рис. 1, слева). Все косы были положены в снежную яму на глубину около 30 см на одном уровне одна рядом с другой и засыпаны слегка утрамбованным снегом, а логгеры лежали в сумке рядом (рис. 1, справа).

Измерения температуры проводились через 15 мин, часы всех логгеров перед установкой были сверены и не должны отличаться более чем на 1–2 мин.

Температура воздуха во время эксперимента составляла около +1 °С, поэтому в толще снега было практически безградиентное температурное поле с температурой вблизи фазового перехода, это положительный момент при проведении эксперимента.

**Обработка результатов.** Полученные данные сняли со всех логгеров и в программе Grapher построили кривые изменения температуры во времени для каждого блока датчиков (в качестве названия файлов выбраны номера датчиков косы В. Кирьякова). На рис. 2 приведены два графика для каждой смотки: первый — за все время измерений, включая начальную выстойку (она составила 50–100 мин), второй — без выстойки в увеличенном масштабе по температуре, чтобы было видно, как работают датчики температуры кос разных производителей.

**Обустройство термометрических скважин в пластиковых трубах в сочетании со статическим зондированием на площадке испытаний СОУ.** На Звенигородском полигоне обустроена новая исследовательская площадка, где тестируются СОУ разного типа. Предполагается проводить новые испытания по работе СОУ круглогодичной эксплуатации. Для оценки эффективности работы СОУ компанией «Фугро» разрабатывается новая методика, которая использует технологию стати-



Рис. 1. Блок термодатчиков (слева) и площадка эксперимента (справа)

ческого зондирования. Технология статического зондирования заключается в следующем: в процессе внедрения зонда-конуса в грунт измеряется ряд параметров — лобовое сопротивление вдавлению, трение по боковой поверхности, температура, поровое давление и ряд других параметров в зависимости от выбранной компоновки. При ис-

пытаниях на Звенигородском полигоне измеряли лобовое сопротивление вдавлению, трение по боковой поверхности и температуру грунтов. На рис. 3 и 4 представлены результаты испытаний, которые фиксируют точку отсчета для мониторинга грунтовых условий на исследуемой площадке.

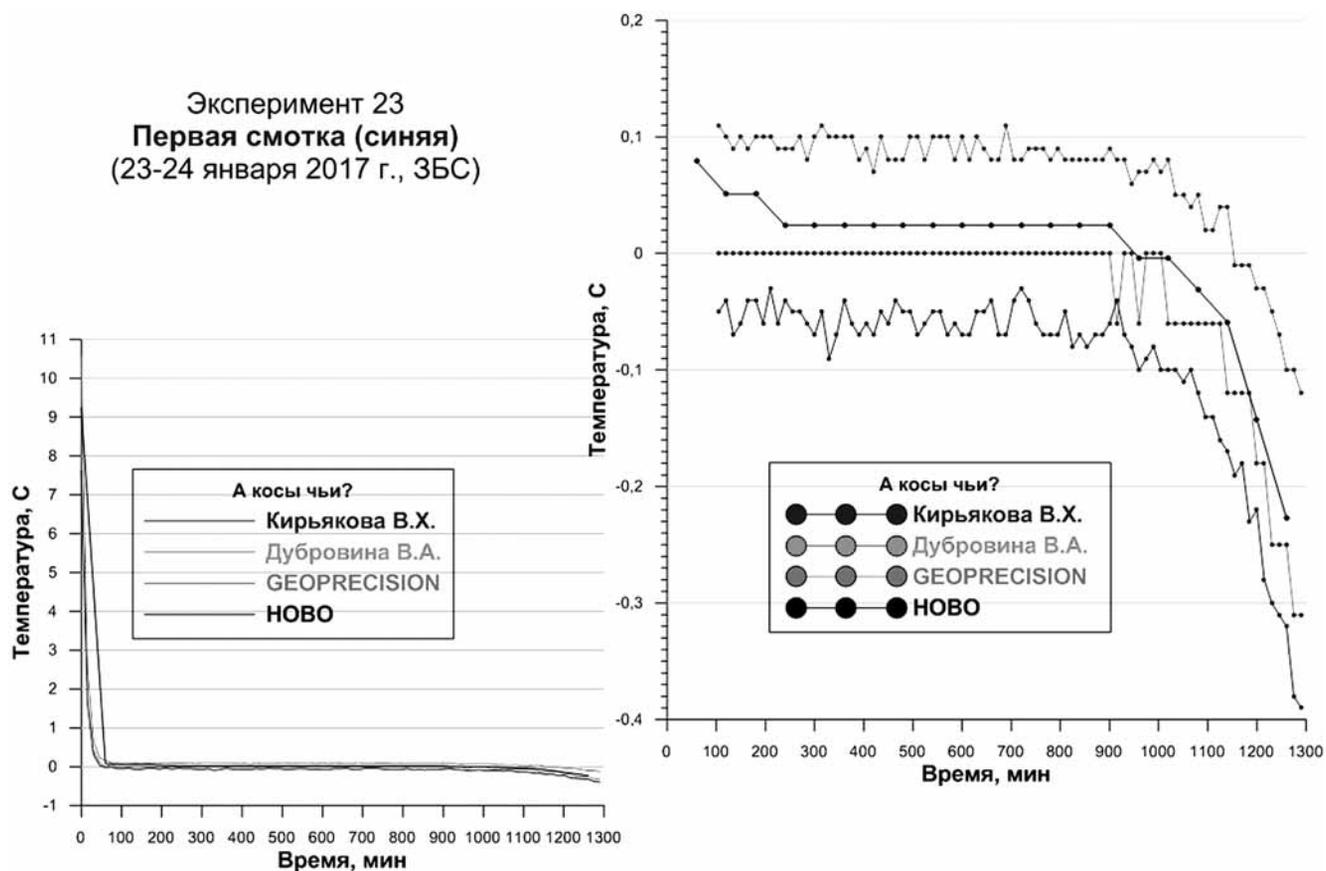


Рис. 2. Сравнение результатов измерения температуры среды температурными косами разных производителей (слева — полный цикл; справа — в интервале температуры  $-0,4 \div 0,1$  °С)

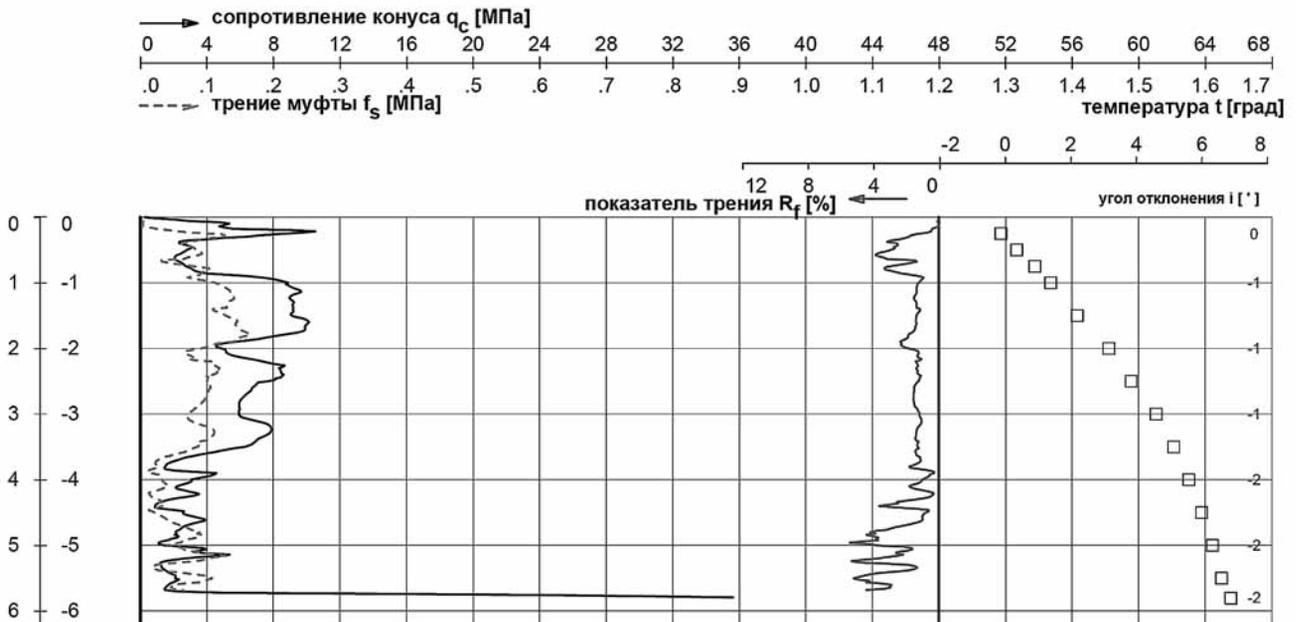


Рис. 3. Результаты статического зондирования грунтов на площадке с термостабилизаторами

Статическое зондирование на мерзлых грунтах — перспективный метод изучения прочностных и деформационных характеристик мерзлых грунтов. С его помощью можно достоверно устанавливать границы распространения мерзлых грунтов и картировать таликовые зоны и зоны распространения грунтов в пластичномерзлом состоянии. Статическое зондирование с помощью конуса с температурным датчиком позволяет получить температурный профиль с заданным шагом с высокой точностью измерения в течение одного дня. С помощью статического зондирования можно также исследовать состояние мерзлых грунтов, охлажденных термостабилизаторами. Главное преимущество этого метода возможность в процессе одного испытания измерить как увеличение механических характеристик мерзлых грунтов, так и понижение температуры мерзлых грунтов.

Таким образом составляется эмпирическая база данных, позволяющая оценить насколько необходимо понизить температуру мерзлых грунтов, чтобы достичь необходимых значений механических свойств мерзлых грунтов. Испытания предполагается проводить ежегодно, чтобы отследить динамику развития промораживания грунтов в процессе работы СОУ.

К преимуществам метода относится то, что данные о температуре можно получать путем прямого измерения на протяжении всего испытания на любой интересующей глубине. После проведения испытания отверстие, оставшееся после внедрения зонда, оборудуется обсадной трубой и оснащается «термокосой» для периодических измерений температуры грунты. Для обустройства термометрической скважины на основе статического зондирования используется сплошная пластиковая

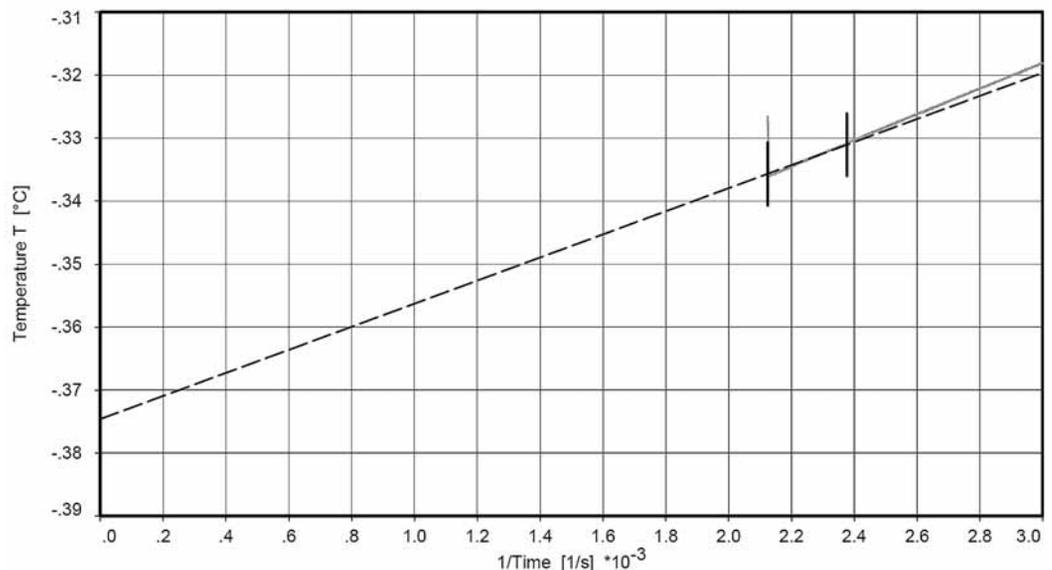


Рис. 4. Результаты замера температуры мерзлых грунтов

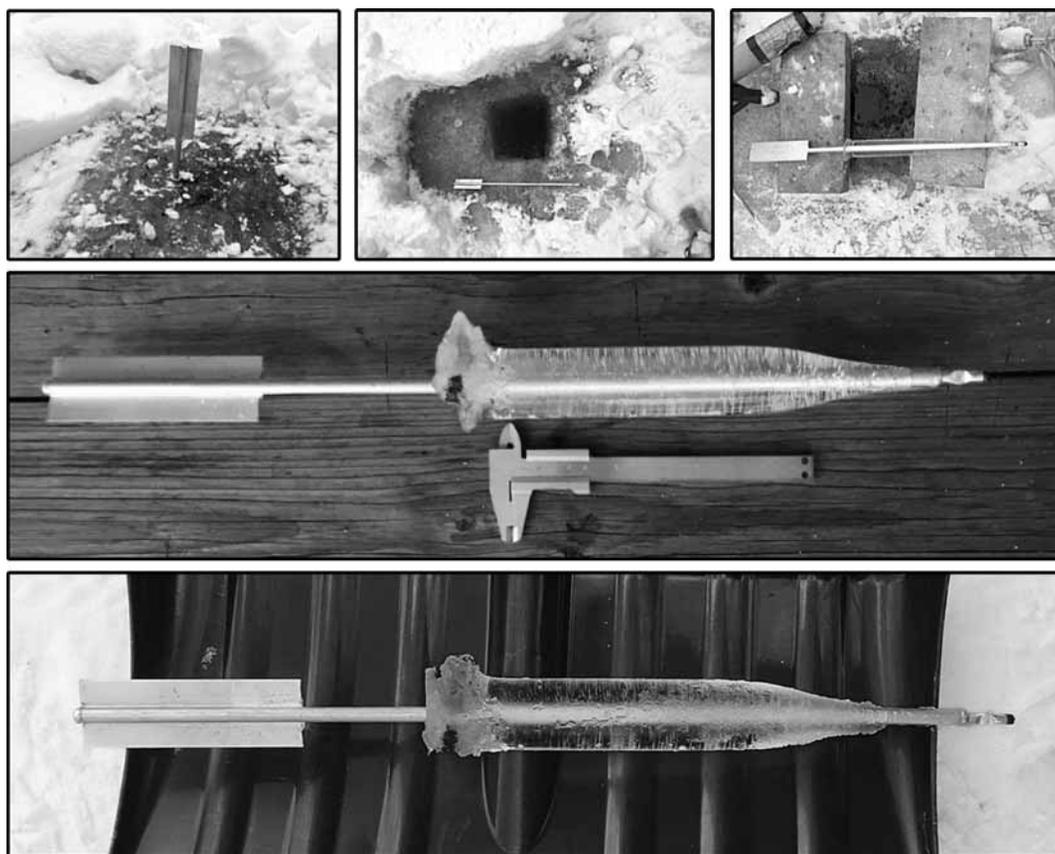


Рис. 5. Установка термостабилизатора в прорубь пресного водоема и замороженный цилиндр льда

труба диаметром 32 мм. Труба герметизируется заглушкой на забое скважины и не имеет стыков и других соединений, что исключает возможность затопления скважины подземными водами. Кроме того, вследствие малого диаметра трубы снижается погрешность измерения температуры грунта за счет уменьшения конвекции воздуха в скважине и за счет более надежной герметизации устья.

Монтаж трубы и установка термокосы проводятся в течение одного-двух часов, при этом выстойка скважины занимает минимальное время — несколько часов, так как во время статического зондирования не нарушается температурный режим грунтового массива. Это существенно сокращает время создания массива термометрических скважин на площадке по сравнению с традиционным методом. При этом технология обустройства термометрических скважин таким способом полностью соответствует требованиям ГОСТ 25358-82 [ГОСТ 25358-82].

Группа компаний «Фугро» рекомендует также устанавливать стационарные термокосы и проводить периодические измерения дистанционным способом, чтобы минимизировать воздействие внешних факторов на скважины. Таким образом, массив точек статического зондирования, оборудованных для мониторинга температуры, позволяет дистанционно получать данные и оценивать изменения состояния грунтового массива.

**Разработка методики расчета тепловой мощности модели СОУ.** В рамках развития программы по тестированию различных видов СОУ на Звенигородском полигоне было предложено разработать новую схему тестирования тепловой мощности СОУ. Существующие методики расчета температурного режима мерзлых грунтов, промораживаемых или охлаждаемых сезонно-охлаждающими устройствами или термостабилизаторами, основаны на решении задачи Фурье с помощью конечно-разностных схем на ЭВМ. Эта методика, однако, имеет до сих пор неразрешенную проблему: каким образом установить температурное условие на границе СОУ–грунт? Существуют разные методики: одни используют среднемесячные значения температуры воздуха и коэффициент теплообмена, другие средние значения теплового потока, предварительно рассчитанные в зависимости от температуры воздуха и ряда других параметров. Однако подбор этих параметров носит субъективный характер и зависит от специалиста (от его опыта, взгляда на проблему, отношения к заказчику и пр.). (Пока не разработана методика, основанная на объективном подходе в назначении температурных граничных условий.)

Для решения поставленной задачи была выполнена новая модель СОУ в небольшом масштабе (рис. 5). Диаметр трубы составляет 10 мм. Длина термостабилизатора или тепловой трубы 560 мм.

Оребрение у СОУ выполнено в виде пластины (44 × 137 мм), чтобы при расчете теплосъема в поверхности оребрения СОУ можно было бы применить более простые, отработанные и надежные эмпирические формулы, которые используются на протяжении десятков лет в теплотехнике. СОУ выполнено из алюминиевого сплава. Тепловой агент внутри тепловой трубы — пентан. Тепловая труба — двухфазная. Количество теплового агента строго дозировано, чтобы внутри тепловой трубы агент «покрывал» тонкой пленкой стенки трубы и оставшийся объем был заполнен парами (газообразной фазой агента). Однако в целях изучения и демонстрации влияния работы жидкой фазы теплового агента в используемую трубу агент был закачан с избытком, поэтому при температуре 0 °С в тепловой трубе при вертикальном положении в зоне испарения накапливался столб из жидкого агента высотой 100 мм. Методика теста достаточно проста (рис. 5). Ее ранее в 1990-х гг. использовала компания «Интер Хит Пайп» [[http://iheatpipe.ru/history\\_retro.html](http://iheatpipe.ru/history_retro.html)]. СОУ было установлено в пресный водоем, как показано на рис. 5, на 18 ч 40 мин (67 200 с) — с 15:00 18 января по 09:40 19 января 2017 г. В этот промежуток времени температура воздуха менялась от –6 до –8 °С (среднее значение за указанный период в –7 °С). Вокруг СОУ сформировался цилиндр льда общей массой 165 г. Диаметр цилиндра составил 35 мм при диаметре трубы испарителя 10 мм. Исходя из полученных данных можно рассчитать тепловую мощность СОУ. Для замораживания 165 г воды необходимо потратить

$$165 \text{ г} \cdot 335 \text{ Дж/г} = 55\,275 \text{ Дж.}$$

Пренебрегая другими значениями теплопереноса при работе термостабилизатора, тепловая мощность СОУ в данных условиях будет равна

$$55\,275 \text{ Дж} / 67\,200 \text{ с} = 0,82 \text{ Вт.}$$

Такой результат имеет большую ценность из-за наглядности и простоты опыта. Каждый тест, выполненный по этой методике, легко верифицировать, поскольку наглядно видно, сколько льда наморозило СОУ за тот или иной период времени. Форма цилиндра льда показывает эффективность работы СОУ и наличие температурного градиента. При тестировании четко видно, что на конце испарительной части СОУ вода замерзла. Ниже уровня, на который был с избытком залит агент, ледяной цилиндр переходит в конус и полностью исчезает. Этот факт наглядно подтверждает, что теплосъем испарителя, где агент залит с избытком (что сегодня норма у большинства производителей) крайне низок и промораживание и/или охлаждение в этой зоне испарителя не происходит.

В рамках Звенигородской практики предлагаем организовать постановку новой задачи,

где студенты выполняли бы короткие тесты по промораживанию воды в пресном водоеме. При их проведении можно рассматривать влияние различных факторов на эффективность работы СОУ, таких, как температура воздуха, скорость ветра и др. Набор данных эмпирической базы при проведении такого тестирования позволит отработать новую методику задания температурных условий на границе СОУ–грунт.

**В рамках проведения Дня науки и инноваций продемонстрировано применение в зимних условиях технологии электротомографии — современной модификации метода сопротивлений.** Электрическая томография (электротомография) представляет собой модификацию метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с использованием многоканальных (многоэлектродных) установок. В этой модификации метода ВЭЗ вдоль профиля наблюдений устанавливается набор электродов, расположенных через равные промежутки. При проведении измерений электроды многократно используются в качестве как приемных, так и питающих. Применение метода электротомографии регламентируется в нормативных документах [СП 11-105-97, ч. VI] для детальных исследований двумерно неоднородных сред. Практический опыт показывает, что электрическая томография хорошо зарекомендовала себя при изучении сложностроенных сред, уточнении строения верхней части геологического разреза и выявлении локальных неоднородностей, изучении карстово-суффозионных процессов, картировании зеркал скольжений оползневых тел, при исследовании мерзлотных козырьков и вялой мерзлоты, а также при решении других задач. Дополнительное преимущество технологии — возможность использовать данные о рельефе в качестве исходного материала наряду с измеренными значениями кажущегося сопротивления для расчета геоэлектрической модели среды, что позволяет применять этот метод на любом рельефе, даже при его весьма существенных превышениях.

В рамках проведения Дня науки и инноваций была продемонстрирована работа российской 16-канальной 64-электродной электротомографической станции «Скала 64» (производитель ООО «КБ Электротометрии», Новосибирск). Эта станция поддерживает работу по различным электроразведочным протоколам, включая установки Веннера, Шлюмберже, дипольную осевую, трехэлектродную (прямую и обратную), двухэлектродную.

Демонстрационные работы проводились по профилю, расположенному вдоль центральной дороги Звенигородского полигона (рис. 6). Шаг по профилю между электродами составлял 3 м. Работы выполнялись по протоколу встречной (комбинированной) трехэлектродной установки AMN–MNB, который обеспечивает максимальную глубину и детальность исследований.

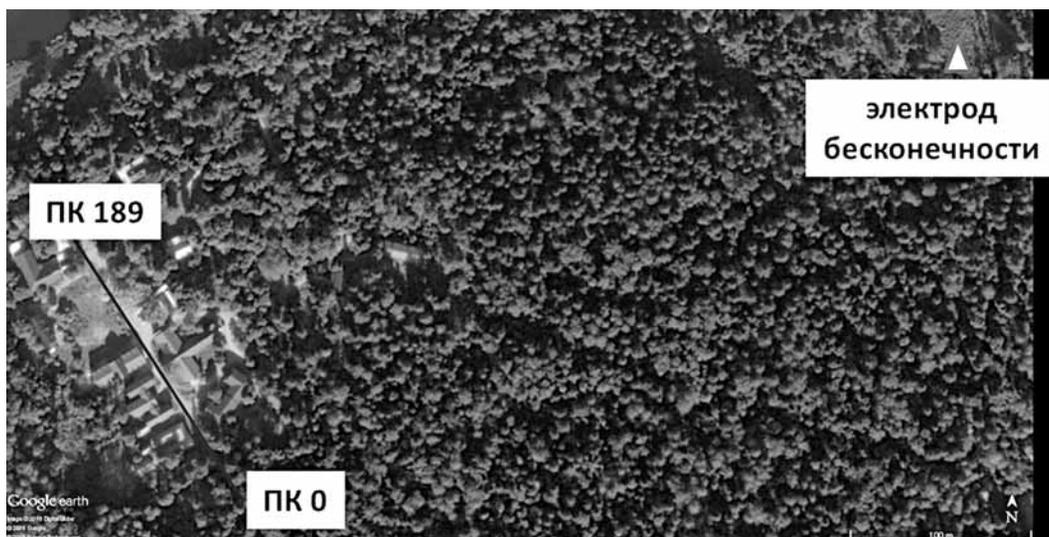


Рис. 6. Расположение на местности профиля электротомографии и электрода бесконечности

Детальность выполненных работ в переводе на точки физических наблюдений составила 64 точки ВЭЗ с шагом по профилю 3 м в двух направлениях (AMN и MNB). Длина профиля при этом составила 189 м, максимальный разнос АО 90 м. Электрод бесконечности был установлен напротив центральной части профиля на расстоянии 400 м.

Проведение электроразведочных работ методом сопротивлений в зимнее время имеет определенную специфику, так как качество получаемых полевых данных сильно зависит от значений переходных сопротивлений между грунтом и электродами. С помощью современных электротомографических станций возможно непосредственно перед проведением измерений произвести замер значений переходного сопротивления.

В нашем случае значения переходного сопротивления между грунтом и электродами, забитыми в мерзлый грунт при помощи пробойника и кувалды неудовлетворительно высокие, варьирующие от 30 до 100 кОм. В качестве эксперимента нами выполнены измерения кажущегося сопротивления

при таких высоких значениях переходного сопротивления (рис. 7).

Для улучшения качества заземлений и снижения значений переходного сопротивления было применено техническое решение, предложенное О.И. Комаровым в 2010 г. и опробованное в ходе большого количества работ. Под каждый электрод при помощи мобильного генератора и перфоратора с длинным буром в грунте выбуривали отверстие глубиной 0,6–0,7 метра (рис. 8). В пробуренное отверстие заливали рассол, погружали и добывали электрод. Такая методика установки электродов позволяет существенно снизить значения переходного сопротивления в зимнее время. В нашем случае после проведенных мероприятий по улучшению качества заземлений значения переходных сопротивлений не превышали 5 кОм (в основном 0,7–1,5 кОм) (рис. 9).

В итоге проведенных мероприятий получены качественные полевые данные (рис. 10), пригодные для дальнейшей обработки и интерпретации.

В результате первичной обработки был подготовлен файл данных для построения гео-

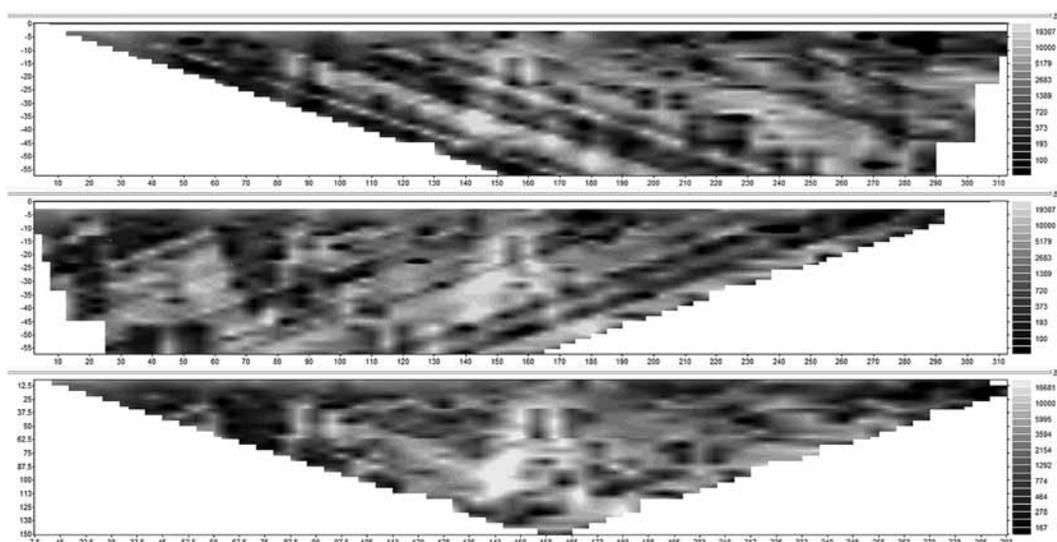


Рис. 7. Неудовлетворительное качество полевых материалов, измеренных при высоких значениях переходного сопротивления. Вверху — псевдоразрез AMN, в середине — MNB, внизу — результирующий AMNB



Рис. 8. Бурение отверстий под электроды



Рис. 9. Значения переходных сопротивлений после мероприятий по улучшению качества заземлений

электрической модели. Интерпретация данных электротомографии выполнялись в рамках двумерного класса моделей при помощи специального программного обеспечения. Подбор геоэлектрической модели среды осуществлялся с помощью процедуры двумерной автоматической инверсии измеренного поля кажущегося сопротивления. Двумерная инверсия — алгоритм, который пересчитывает наблюдаемое электрическое поле в соответствующее ему двумерное распределение удельного сопротивления. При таком подходе в поиске решения учитывается вся совокупность измеренных данных.

При изменении параметров подбора модели, введении априорной информации в базовую модель, применении различных алгоритмов фильтрации и сглаживания оператор влияет на получаемый результат. После введения необходимых параметров программа автоматически рассчитывает математическую модель среды и строит геоэлектрический разрез. Так как такая задача некорректная, используется регуляризация решения за счет моделей с плавным изменением удельного сопротивления. Из-за интегрального характера метода сопротивлений полученное решение, как

правило, упрощает и сглаживает реальные детали геологического строения разреза. Кроме того, на разрезе могут появляться ложные аномалии, связанные с объектами, расположенными рядом с профилем наблюдений и неустойчивостью инверсии. Отдельную проблему представляют очень контрастные объекты техногенного происхождения (например, магистрали коммуникаций водоснабжения и канализации и т.п.). Значения глубины по результатам поверхностных геофизических исследований определяются оценочно из-за наличия эквивалентных связей между сопротивлением и мощностью грунтов. В результате интерпретации получен геоэлектрический разрез по профилю исследований (рис. 11).

Полученный геоэлектрический разрез имеет сложное строение. В верхней части до глубины 3–4 м на ПК 42–69, ПК 99–129, ПК 144–189 ярко выделяются линзовидные зоны, характеризующиеся высокими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС), варьирующими в диапазоне 1500–5000 Ом·м, литологически соответствующие дренированным пескам. На ПК 0–42, ПК 69–99 в приповерхностной части наблюдаются грунты, характеризующиеся средними

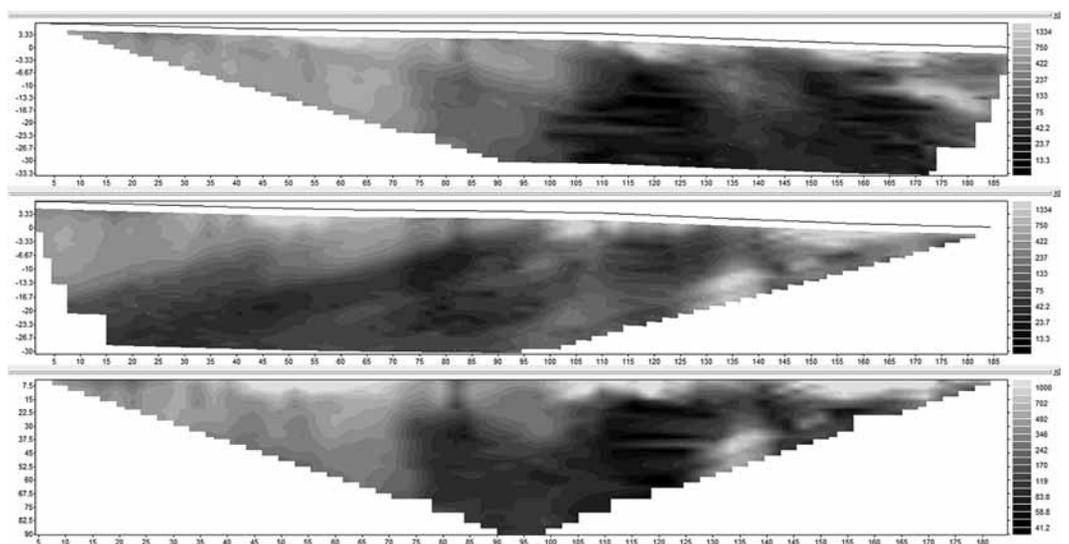


Рис. 10. Псевдоразрезы кажущихся сопротивлений вверху — AMN, в середине — MNB, внизу результирующий — AMNB

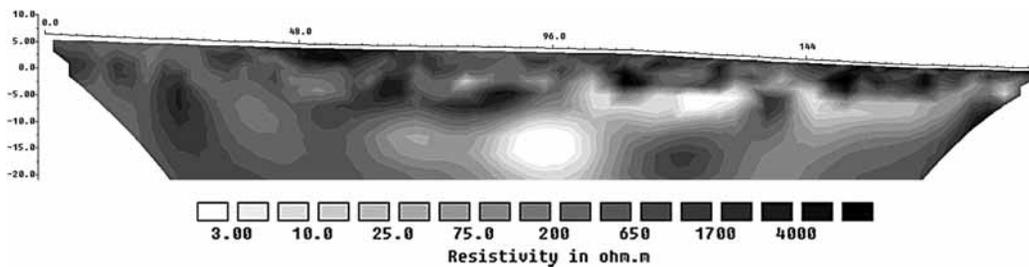


Рис. 11. Геоэлектрический разрез по профилю исследований

значениями УЭС, варьирующими в диапазоне 100–300 Ом·м и что, судя по всему соответствует супесчаным влажным грунтам. В диапазоне ПК 99–189 на глубине 7–12 м выделяется низкоомный слой с УЭС грунтов 10–30 Ом·м, которому, видимо, соответствуют обводненные элювиальные отложения, представленные элювием известняка и песчано-суглинистыми грунтами. Также в районе ПК 27–48 на глубине 7 м и глубже фиксируется зона пониженного сопротивления (100–200 Ом·м), к которой, возможно, приурочены трещиноватые известняки низкой сохранности. Особо отметим аномальную зону, выделяющуюся в диапазоне ПК 78–102 на глубине 12–15 м, характеризующуюся низкими значениями УЭС (10–30 Ом·м). Этой аномалии может соответствовать зона суглинистых/глинистых грунтов, а также зона разрушенного известняка. Аномалию можно объяснить и другими причинами — такими яркими аномальными зонами на геоэлектрических разрезах часто проявляются зоны расположения коммуникаций, и как правило, протечек. Поэтому для выяснения природы этой аномалии необходимо провести заверочное бурение.

В заключение подчеркнем, что метод электротомографии характеризуется высокой детальностью исследований, а несложные технические решения позволяют применять его в зимних условиях на промерзших грунтах.

**Лазерное сканирование** — эффективная технология получения пространственных данных с высокой точностью и скоростью, основанная на измерениях расстояния и двух углов до объекта с

использованием множества маломощных лазерных импульсов. Инструменты, выполняющие такие измерения, — это трехмерные лазерные сканеры. В результате выполненных сканерами измерений специалисты получают точки лазерных отражений, для которых вычисляются пространственные координаты ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), а также форма и интенсивность отраженного сигнала. Полученные данные используются для построения пространственных цифровых моделей измеряемых объектов. Лазерное сканирование — метод съемки, уже прочно занявший свою нишу на рынке индустрии получения объективных пространственных данных. По сравнению с традиционными методами измерений, которые обеспечивают получение лишь дискретных точечных измерений в избранных местах объектов, с помощью устройств для лазерного сканирования получают измерения поверхностей объектов целиком, что обеспечивает при этом полное покрытие их точками лазерных отражений (измерений).

По аналогии с офисными копировальными устройствами, использующими свет для того, чтобы скопировать документ линия за линией, лазерные сканеры «копируют» окружающий мир с помощью лазерных импульсов. Лазерное сканирование может быть дополнено фотограмметрической информацией об объекте съемки. В этом случае точки лазерных отражений в результате сканирования будут дополнены реальной окраской. Лазерное сканирование, в отличие от фотограмметрических методов съемки, имеет прямое, т.е. не вычисленное, измерение дальности

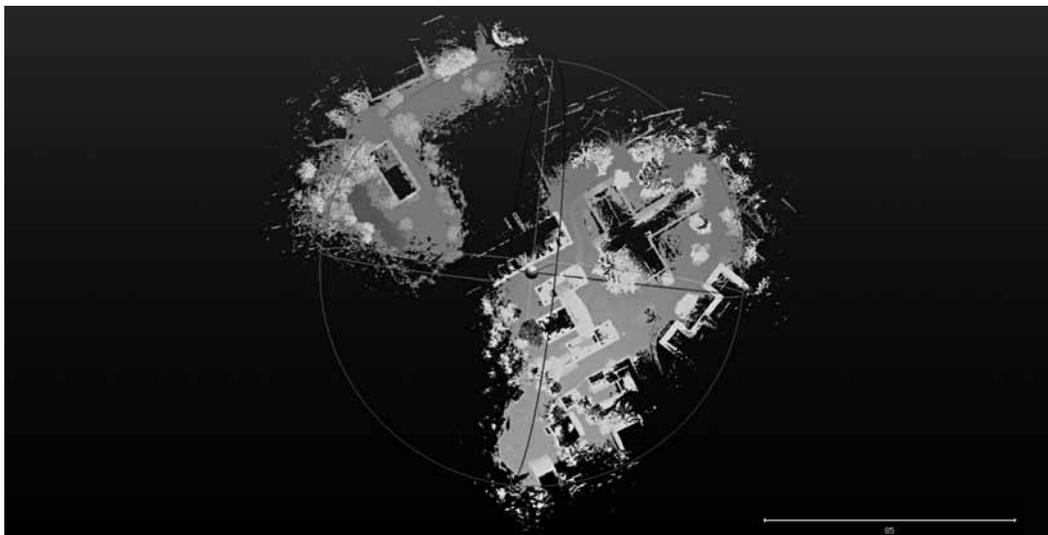


Рис. 12. Лазерное сканирование территории Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова с участками температурных наблюдений и полигоном изучения термостабилизации

Рис. 13. Снимок учебно-научного геокриологического полигона на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова с квадрокоптера Phantom 3



сти до объекта, а также не зависит от внешних факторов, таких, как освещенность, влияющих на возможность выполнения измерений в фотограмметрии. В рамках Дня науки и инноваций было проведено лазерное сканирование территории Звенигородской биостанции с участками температурных наблюдений и полигона изучения СОУ (рис. 12).

**Геокриологическое картирование с помощью беспилотных летательных аппаратов.** Традиционно для решения геокриологических задач — ландшафтного микрорайонирования, идентификации криогенных явлений, оценочных измерений характерных неоднородностей рельефа, снегонакопления и др. — используются методы наземной съемки. Однако в силу труднодоступности и непроходимости многих районов исследований предпочтение отдается дешифрированию аэрофотоснимков (АФС). Вместе с тем мелкое разрешение АФС не позволяет дешифровать проявления криогенных процессов и выделять опорные участки ландшафтного микрорайонирования.

При решении локальных задач по ландшафтному микрорайонированию наиболее востребованы квадрокоптеры небольшого размера и с небольшим радиусом покрытия территории.

Во время проведения Дня науки и инноваций представитель Института геоэкологии РАН, руководитель проекта Д.О. Сергеев представил программу «Оценка микроландшафтной неоднородности с применением аэрофото- и видеосъемки с малых летательных аппаратов». Применение квадрокоптеров позволяет с высоты 50–100 м осуществлять повторяющуюся съемку полосы землеотвода протяженных линейных инженерных объектов (автодороги, железные дороги, трубопроводы) с целью получения топографически привязанных визуальных изображений и аэрофотоснимков в видимом и инфракрасном диапазоне. Эти данные позволяют выполнять ландшафтное микрорайонирование и идентификацию геокриологических явлений и экзогенных геологических процессов (оползни, сели, обвалы, лавины, камнепады и др.) [Сергеев и др., 2007].

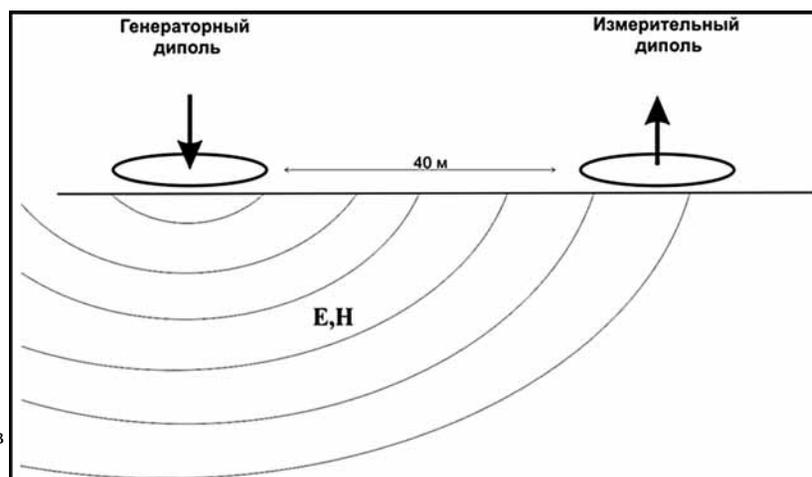


Рис. 14. Принципиальная схема в методе ВЭЗ в модификации ЧЗ



Рис. 15. Комплект аппаратуры HF-EM (слева — генератор, справа — измеритель)

В рамках Дня науки и инноваций участники получили навыки по планированию и выполнению перспективной аэрофото- и видеосъемки (рис. 13), а также по обработке ее результатов для решения геокриологических задач (обеспечение ландшафтного микрорайонирования, идентификация криогенных явлений, оценочные измерения характерных неоднородностей рельефа, снегонакопления и т.п., влияющих на условия теплообмена).

**Метод частотного зондирования (ЧЗ).** Этот метод относится к электромагнитным методам геофизических исследований. Геофизические исследования электромагнитными методами выполняются на участках, где проведение работ на постоянном токе (электропрофилирование, вертикальное электрическое зондирование) невозможно или затруднительно из-за отсутствия гальванической связи измерительной линии с поверхностью, например, если в разрезе присутствуют грунты с высоким электрическим сопротивлением, как в случае с сезонномерзлым слоем.

Технология ЧЗ (как разновидность электромагнитных зондирований) основана на использовании переменных электромагнитных полей. К достоинствам технологии относится бесконтактный способ возбуждения и приема электромагнитного поля, что обеспечило этим технологиям широкое применение в условиях скальных и мерзлых грунтов. В методе ЧЗ для исследования верхней части разреза используется искусственное электромагнитное поле в диапазоне частот от 4 до 1024 кГц. Поле возбуждается и измеряется на одной частоте с помощью антенн (многовитковых рамок), расположенных горизонтально на некотором расстоянии одна от другой (рис. 14).

Максимальная глубина исследований не превышает расстояние от источника до приемника. Для проведения работ методом частотных зондирований используется аппаратура HF-EM (рис. 15) (производитель ООО «МГУ-Геофизика», Москва).



Рис. 16. Схема расположения профиля частотного зондирования на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова (ЗБС) (вверху) и разрез кажущегося (эффективного) электрического сопротивления по данным ЧЗ (внизу)

Метод ЧЗ был продемонстрирован на участке от преподавательского домика до въезда из Звенигородской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (рис. 16).

Измерения проводились в непрерывном режиме измерений, генераторная и измерительная антенны были установлены на пластиковые непроводящие сани, которые приводились в движение при помощи снегохода, движущегося на малой скорости.

В результате анализа данных измерений по исследуемому профилю получен геоэлектрический разрез кажущегося сопротивления грунтов.

На разрезе выделяются зоны с повышенным электрическим сопротивлением. В верхней части разреза аномалии высокого сопротивления связаны с наличием в разрезе сезонномерзлых грунтов. Так, например, в центральной части профиля выявлена яркая аномалия высокого электрического сопротивления грунтов. Эта аномалия, вероятно, связана с расчисткой снега у ворот на въезде на станцию и как следствие с более глубоким сезонным промерзанием грунтов на этом участке. Также при продвижении к выезду на Луцинское шоссе в нижней части разреза начинают появляться породы с пониженными значениями электрического сопротивления, что может быть связано с появлением в разрезе более дисперсных пород.

**Изучение СОУ на базе нового учебно-научного геокриологического полигона.** В рамках Дня науки и инноваций студенты знакомились с новым учебно-научным геокриологическим полигоном. На нем в настоящее время функционируют 4 сезонных охлаждающих устройства (СОУ). Эти устройства широко применяются для термостабилизации грунтовых оснований при строительстве и эксплуатации сооружений в зонах распространения многолетнемерзлых пород [Вялов, 1981]. Их функционирование связано с использованием хладопотенциала атмосферного воздуха в зимний период. В России изготовлением СОУ занимаются такие предприятия, как ОАО «Фундаментпроект»,



Рис. 17. 10-метровые СОУ вертикального типа естественной циркуляции с температурными скважинами

ООО «НьюФрост», ФСА «ФундаментСтройАркас», ЗАО «Хит Пайп», ООО «Ривсмаш» и др. Глубина установки СОУ обычно ограничена 10–15 м. Характерный размер (диаметр) 33,7–57 мм, уровень температуры  $-2 \div -10$  °С на контакте. В качестве хладоносителя используются: а) фреон R404a (озонобезопасный) с давлением среды  $P_{\text{ср.}} = 4,67 \div 3,55$  ат и теплосъемом 10–15 Вт/м; б) аммиак — R717 с  $P_{\text{ср.}} = 4 \div 2,9$  ат — наиболее эффективный по теплоотдаче хладоноситель, с теплосъемом 25–30 Вт/м.; в) углекислый газ  $\text{CO}_2$  — R744 с  $P_{\text{ср.}} = 33 \div 26$  ат и теплосъемом 12–18 Вт/м.

На Звенигородском полигоне установлены 10-метровые СОУ вертикального типа естественной циркуляции (рис. 17), при этом два термостабилизатора, где в качестве хладоносителя используется аммиак; один заполнен фреоном, один — углекислым газом. Для контроля и мониторинга работы СОУ вблизи термостабилизаторов находятся 10-метровые температурные скважины, где в качестве термодатчиков используются полупроводниковые датчики сопротивления. Показания датчиков фиксируются логгером.

К недостаткам использования таких СОУ следует отнести сезонность работы и периода установки в массив пород; относительно невысокую скорость промораживания, проблемы с промораживанием сильнозасоленных пород, а к преимуществам — отсутствие энергетических затрат и необходимости обслуживать в процессе эксплуатации.

**Заключение.** Современные технологии, опробованные на Дне науки и инноваций, существенно расширили традиционные полевые методы геокриологических исследований.

Собранные в рамках Дня науки и инноваций полевые материалы существенно дополнили базу инженерно-геокриологических данных, используемую при проведении инженерно-геокриологической практики студентов геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Проведенное на Дне науки и инноваций тестирование температурных кос от разных производителей позволило провести независимую оценку технических характеристик, заявленных производителями. Это позволяет рассматривать исследованную территорию в качестве испытательного полигона для специализированного полевого инженерно-геокриологического оборудования.

Работа научно-исследовательского геокриологического полигона на Звенигородской биостанции МГУ имени М.В. Ломоносова позволила провести натурные эксперименты с сезонно-охлаждающими устройствами (производства ООО РивсМаш). Эта программа направлена на исследование температурных полей около термостабилизатора, изучение эффективности использования различных агентов в качестве теплообменных жидкостей, изучение происходящих во внутритрубном пространстве фазовых переходов и влияния интенсивности фазовых переходов на работу термостабилизатора по глубине.

Картирование с помощью БПЛА существенно интенсифицирует процесс получения первичных данных для дешифрирования криогенных процессов, мерзлотного микрорайонирования и выявления площадей, находящихся при строительстве в зонах риска, благодаря заполнению ниши между маршрутными полевыми съемочными исследованиями и космической съемкой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Балобаев В.Т., Девяткин В.Н., Кутасов И.М.* Современные геотермические условия существования и развития многолетнемерзлых пород // Докл. и сообщения II Междунар. конф. по мерзлотоведению. Вып. 1. Теплофизические процессы формирования и развития криолитозоны. Якутск, 1973. С. 11–19.

*Вялов С.С., Александров Ю.А., Городецкий С.Э.* и др. Термосваи в строительстве на Севере. Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1984. 148 с.

Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.

Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.

Полевые методы геокриологических исследований: Метод. руководство по учебной практике студентов геологического факультета МГУ / Под ред. Э.Д. Ершова и Г.И. Гордеевой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 143 с.

СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Приложение Л. «Определение

механических свойств и несущей способности оснований свай в многолетнемерзлых грунтах по результатам статического зондирования». ???

СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Приложение Л. «Определение механических свойств и несущей способности оснований свай в многолетнемерзлых грунтах по результатам статического зондирования».

*Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станюковская Ю.В., Романовский В.Е.* Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах Северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 2. С.??

ГОСТ 25358-82. URL: <http://gostexpert.ru/data/files/25358-82/44d4973d1d81c71ce9f17a9dfb601dd6.pdf>

СП 11-105-97 часть VI. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293854/4293854049.pdf>

URL: [http://iheatpipe.ru/history\\_retro.html](http://iheatpipe.ru/history_retro.html)

Поступила в редакцию 00.00.2018

Поступила с доработки 00.00.2018

Принята к публикации 00.00.2018

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 550.831

Л.С. Чепиго<sup>1</sup>, Н.С. Ткаченко<sup>2</sup>, И.В. Лыгин<sup>3</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ПО ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОЛЮ, ЗАДАННОМУ НА СФЕРЕ

Приводится описание метода определения параметров точечного источника по значениям гравитационного поля, заданным на сферической поверхности. На модельных примерах выполнено определение глубины точечного источника с использованием выражений для поля, заданного на плоскости, и с использованием предложенного метода. Сравнение результатов, полученных двумя методами, позволяет сделать выводы об условиях практического применения разработанного метода.

*Ключевые слова:* гравиразведка, небесные тела, обратная задача гравиразведки, прямая задача гравиразведки, метод характерных точек.

The article describes a method of calculation of point source's parameters from the gravity field, measured on a sphere. Conclusions about the conditions for the practical application of the developed method are drawn on the basis of a comparison of the results of spherical source coordinates and mass estimation by a field given on the plane and on the sphere.

*Key words:* gravity, inverse problem, forward problem, iti-method.

**Введение.** В последние годы по результатам спутниковых миссий (GRACE, GOCE, GRAIL, KAGYA) получены новые модели гравитационного поля Земли [Tapley et al., 2004] и Луны [Kato et al., 2010; Zuber et al., 2013], которые характеризуются высокой степенью точности (до  $\pm 0,01$  мкГал) и детальности от  $1^\circ$  до  $1'$  [Save et al., 2016; Wiese et al., 2016].

Такие модели содержат информацию о высокочастотных аномалиях гравитационного поля, их можно использовать не только для решения планетарных задач гравиметрии, но и для геологического изучения плотностных неоднородностей литосферы и верхней мантии.

Для решения такой задачи необходима адаптация математических методов решения обратной задачи гравиразведки, широко развитых для расчетов на плоскости, к применению их на сферической поверхности. В частности, одно из важнейших направлений — разработка методов локализации особых точек по гравитационному полю, заданному на сфере, с помощью которых можно определять координаты и массу источников гравитационного поля, расположенных внутри сферы.

В гравиразведке для решения задачи определения глубины залегания и массы точечного источника по полю, заданному на плоскости, широко используются методы характерных точек (МХТ). Основное внимание исследователей при решении

задач гравиразведки с учетом сферичности Земли сосредоточено на решении прямых задач [Старостенко и др., 1986; Булычев и др., 1998; Кузнецов и др., 2017] в сферической системе координат. При этом экспресс-методы оценки параметров источников аномалий, т.е. методы решения обратных задач практически не рассматриваются. В связи с этим может быть поставлена задача адаптации математических методов решения обратной задачи гравиразведки, разработанных для расчетов на плоскости, к полям, заданным на сферической поверхности.

**Математические основы метода.** При определении параметров геологических объектов, создающих гравитационные аномалии, эти объекты часто уподобляют телам, имеющим правильную форму. Так, многие геологические объекты более или менее изометричной формы можно аппроксимировать сферическим (точечным) источником. Степень соответствия тем выше, чем больше расстояние от тела до притягиваемой точки [Мионов, 1980]. Классический способ определения параметров сферической массы (положение центра и масса) по гравитационному полю, заданному на плоскости, описан практически во всех учебниках по гравиразведке [Мионов, 1980]. Его простейшая реализация в гравиразведке известна под названием «метод характерных точек», в котором глубина залегания сферического источника  $h$  опре-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; *e-mail:* chepigos@yandex.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирантка; *e-mail:* kostinans@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* ivanlygin@mail.ru

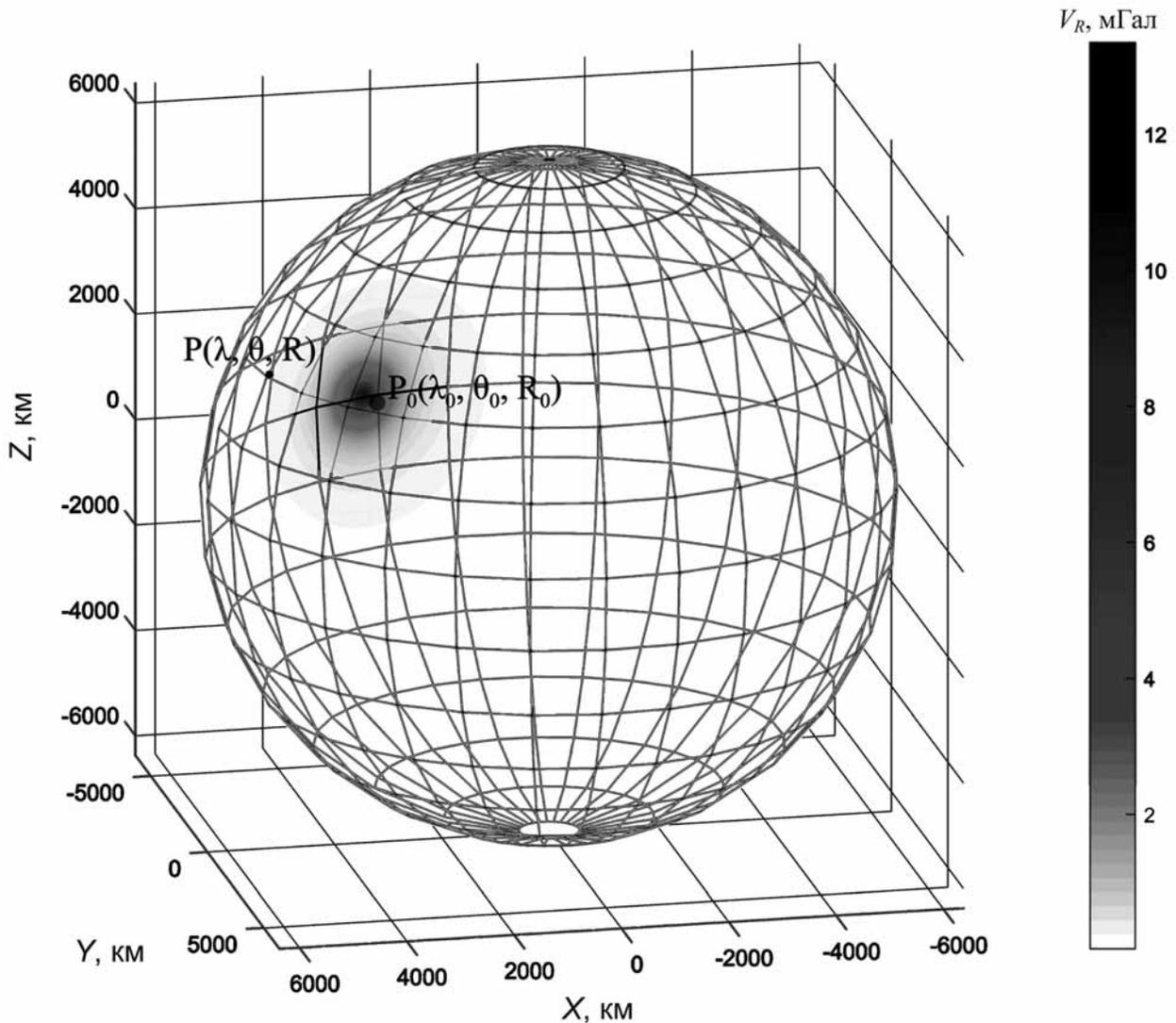


Рис. 1. Гравитационное поле точечного источника на сфере

деляется через расстояние  $x_{1/2}$  от экстремума аномалии поля силы тяжести до точки, для которой амплитуда аномалии в 2 раза меньше максимального значения [Блох, 2009; Булычев и др., 2017]:

$$h = 1,31x_{1/2}. \quad (1)$$

Рассмотрим случай определения параметров сферической массы по гравитационному полю, заданному на сферической поверхности. В сферической системе координат положение точки определяется значением трех координат  $(R, \theta, \lambda)$ , где  $R$  — расстояние от начала координат до точки,  $\theta$  и  $\lambda$  — зенитный и азимутальный углы соответственно.

Пусть центр масс источника гравитационного поля (сферическая масса) находится внутри сферы радиуса  $R$  в некоторой точке с координатами  $P_0(R_0, \theta_0, \lambda_0)$  и пусть в точках на поверхности сферы  $P(R, \theta, \lambda)$  известно его гравитационное поле (рис. 1). Определим положение центра масс источника и его массу по известным значениям гравитаци-

онного поля — гравитационного потенциала и вертикальной (радиальной) составляющей силы притяжения.

В сферической системе координат гравитационный потенциал сферической массы  $M$ , расположенной в точке  $P_0(R_0, \theta_0, \lambda_0)$ , в произвольной точке  $P(R, \theta, \lambda)$  выражается формулой:

$$V(P) = G \frac{M}{R_{PP_0}} = G \frac{M}{\sqrt{R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \psi}}, \quad (2)$$

$$\cos \psi = \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\lambda_0 - \lambda) + \cos \theta_0 \cos \theta, \quad (3)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная.

Дифференцируя выражение для потенциала по направлению к центру сферы, получим выражение для вертикальной (радиальной) составляющей силы притяжения сферической массы в точке  $P$ :

$$V_R(P) = -V'(P) = GM \frac{R - R_0 \cos \psi}{(R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \psi)^{3/2}}. \quad (4)$$

На сфере заданного радиуса гравитационный потенциал и сила притяжения достигают экстремума в точке с широтой и долготой, равными широте и долготе точечной массы соответственно. Следовательно, в точке экстремума  $\theta_{\max} = \theta_0$  и  $\lambda_{\max} = \lambda_0$ :  $\cos \psi = 1$  и выражения для гравитационного потенциала и силы тяжести в точке экстремума имеют вид:

$$V_{\max} = GM \frac{1}{R - R_0}, \quad (5)$$

$$V_{R_{\max}} = GM \frac{1}{(R - R_0)^2}. \quad (6)$$

Расстояние от начала координат до точечной массы  $R_0$  можно определить через отношение соответствующих компонент гравитационного действия сферы (гравитационного потенциала, силы тяжести) в точке  $P$  к максимальному значению ( $n, k$ ):

$$n = \frac{V(P)}{V_{\max}} = \frac{R - R_0}{\sqrt{R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \psi}}, \quad (7)$$

$$k = \frac{V_R(P)}{V_{R_{\max}}} = \frac{(R - R_0 \cos \psi)(R - R_0)^2}{(R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \psi)^{3/2}}. \quad (8)$$

Выражение (7) сводится к уравнению 2-й степени относительно  $R_0$ , которое имеет два корня: больше и меньше  $R$ , из которых условию задачи удовлетворяет только меньший, поскольку источник находится внутри сферы:

$$R_0^2 - 2RR_0 \frac{1 - n^2 \cos \psi}{1 - n^2} + R^2 = 0, \quad (9)$$

$$R_0 = \frac{k \sqrt{(1 - \cos \psi)(2 - k^2(1 + \cos \psi)) + k^2 \cos \psi - 1}}{k^2 - 1} R. \quad (10)$$

Выражение (8) сводится к алгебраическому уравнению 6-й степени относительно  $R_0$ :

$$k_6 R_0^6 + k_5 R_0^5 + k_4 R_0^4 + k_3 R_0^3 + k_2 R_0^2 + k_1 R_0 + k_0 = 0, \quad (11)$$

$$k_6 = k^2 - \cos 2\psi,$$

$$k_5 = R(4\cos^2 \psi - 6k^2 \cos \psi + 2\cos \psi),$$

$$k_4 = R^2(12k^2 \cos^2 \psi - 6\cos^2 \psi + 3k^2 - 8\cos \psi - 1),$$

$$k_3 = R^3(-8k^2 \cos^3 \psi + 4\cos^2 \psi - 12k^2 \cos \psi + 12\cos \psi + 4),$$

$$k_2 = R^4(12k^2 \cos^2 \psi - \cos^2 \psi + 3k^2 - 8\cos \psi - 6),$$

$$k_1 = R^5(-6k^2 \cos \psi + 2\cos \psi + 4),$$

$$k_0 = R^6(k^2 - 1).$$

Уравнение (11) решается численными методами (например, методом касательных) с заданной точностью. Среди шести возможных корней уравнения единственное искомое решение — действительное значение, величина которого меньше  $R$ .

Масса сферы определяется с учетом найденного положения центра сферы:

$$M = \frac{V_{\max}(R - R_0)}{G}, \quad (12)$$

$$M = \frac{V_{R_{\max}}(R - R_0)^2}{G}. \quad (13)$$

### Алгоритмизация метода и тестовые расчеты.

Для расчета параметров точечных источников по гравитационному полю, заданному на сфере, в среде Matlab реализован следующий алгоритм. В качестве входных данных задается сеточный файл аномального гравитационного потенциала или поля силы тяжести в географической системе координат, покрывающий сферическую поверхность частично либо полностью, и определяется радиус, на котором определено поле. В автоматическом режиме выбирается экстремум поля. На основе формул (9)–(13) вычисляются глубина залегания источника и его масса. Увеличение точности расчетов достигается многократным решением уравнений (9), (11) для всех точек задания поля (кроме точки экстремума). Результаты работы программы — глубина до источника и его масса. Опционально могут быть вычислены плотность или радиус источника в зависимости от заданного параметра.

Ниже представлены результаты оценки значений глубины известного точечного источника с использованием предложенного алгоритма: а) для теоретических (точных) значений элементов гравитационного поля и б) для теоретических значений с «добавлением» шума. Также были рассчитаны значения гравитационного поля на плоскости с использованием цилиндрической проекции поля, заданного на сферической поверхности, и выполнены оценки глубины точечного источника с использованием известного метода характерных точек.

Для тестовых расчетов выбраны три сферические поверхности, соответствующие малому небесному телу (например, Луне) с радиусом 2000 км, среднему (например, Земле) с радиусом 6371 км и крупному (например, Нептуну) с радиусом 25 000 км. На каждой сфере по всей поверхности с дискретностью  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  заданы точные (теоретические) значения гравитационного поля точечного источника, расположенного на глубине 30, 100, 250 и 500 км от поверхности сфер (рис. 1). Масса источника выбрана  $5 \cdot 10^{14}$  кг (при плотности  $0,12$  г/см<sup>3</sup> радиус равен 9,98 км), широта и долгота источника составляют  $30^\circ$  и  $40^\circ$  соответственно.

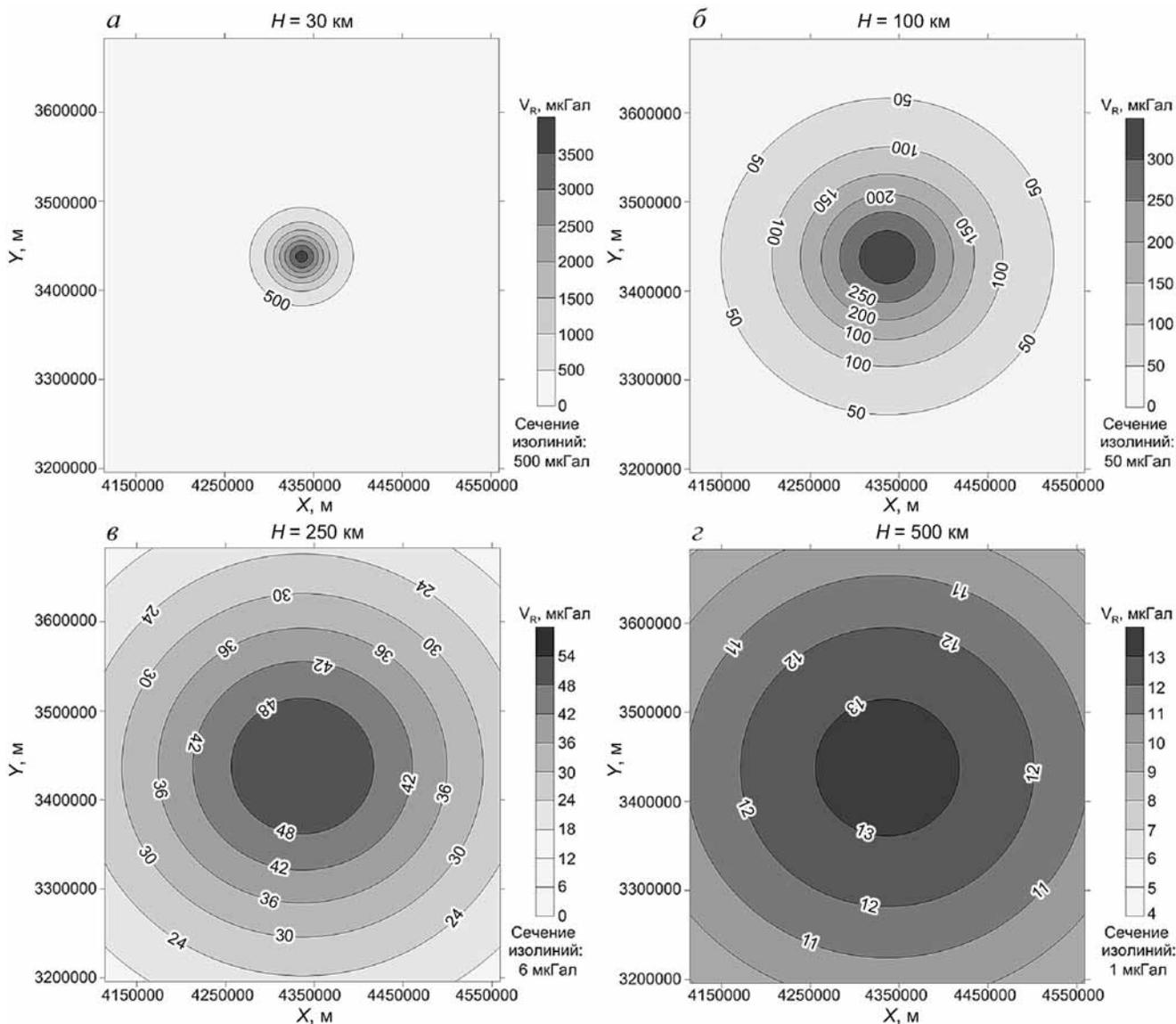


Рис. 2. Сила притяжения точечной массы, расположенной на глубине: а — 30 км, б — 100 км, в — 250 км, г — 500 км на поверхности сферы радиусом 6371 км

В табл. 1 приведены результаты определения глубины залегания точечного источника двумя способами: с учетом сферичности и на плоскости. Для решения обратной задачи на плоскости сферические координаты пересчитаны в цилиндрическую проекцию Миллера (рис. 2), вычисления выполнены с использованием формулы (1).

Очевидно, что при определении положения центра масс источника без учета сферичности глубина оказывается завышенной. Погрешность возрастает с увеличением глубины залегания центра масс и с уменьшением радиуса сферы, на которой задана аномалия. При учете сферичности результаты соответствуют теоретическим значениям при условии, что исключены ошибки при измерении поля силы тяжести.

Для оценки чувствительности описываемого метода к помехам для модели с источником на глубине 500 км для всех сфер в гравитационное поле добавлен белый шум с уровнем 5, 10 и 15%

Таблица 1

Сравнение результатов определения глубины точечного источника с учетом и без учета сферичности

Радиус сферы, км	Истинная глубина, км	Глубина по обратной задаче		Относительное расхождение, %
		с учетом сферичности, км	на плоскости, км	
2000	30	30	35	17
	100	100	119	19
	250	250	328	31
	500	500	713	43
6371	30	30	34	13
	100	100	117	17
	250	250	297	19
	500	500	637	27
25000	30	30	33	10
	100	100	115	15
	250	250	292	17
	500	500	595	18

от максимального значения поля. Параметры источника определяли по значениям радиальной компоненты силы притяжения, которые отличаются от максимального значения не более чем в 2 раза. В табл. 2 представлены результаты оценок глубины залегания точечного источника по «за шумленным» данным.

Таблица 2

Сравнение результатов определения глубины точечного источника с учетом и без учета сферичности

Радиус сферы, км	Глубина источника, км	Глубина при уровне шума, %			Относительная погрешность при уровне шума, %		
		5	10	15	5	10	15
2000	30	31,6	27,4	34,0	5,4	8,7	13,2
	100	94,3	90,0	112,1	5,7	10,0	12,1
	250	236,5	227,1	220,7	5,4	9,2	11,7
	500	469,7	445,4	570,2	6,1	10,9	14,0
6371	30	28,2	32,9	33,1	6,1	9,7	10,4
	100	93,7	89,7	113,7	6,3	10,3	13,7
	250	234,5	276,9	217,6	6,2	10,7	13,0
	500	463,5	565,7	574,0	7,3	13,1	14,8
25000	30	31,9	27,1	33,2	6,2	9,6	10,8
	100	106,1	111,1	87,7	6,1	11,1	12,3
	250	233,1	222,5	215,2	6,7	11,0	13,9
	500	453,3	415,7	589,5	9,3	16,9	17,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: Учеб. пособие. М.: РГГРУ, 2009. 232 с.

Булычев А.А., Кривошея К.В., Мелихов В.Р., Зальцман Р.В. Вычисление аномального гравитационного потенциала и его производных на сфере // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1998. № 2. С. 42–46.

Булычев А.А., Лыгин И.В., Мелихов В.Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки (конспект лекций): Учеб. пособие для студентов и магистрантов специализации «Геофизика». М., 2010. 164 с.

Булычев А.А., Лыгин И.В., Соколова Т.Б. и др. Конспект лекций по курсу «Гравиразведка». Ч. I. М.: КДУ, «Университетская книга», 2017. 124 с.

Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Булычев А.А. Алгоритм численного решения прямой задачи гравиметрии от сферического слоя переменной плотности // Геофизика. 2017. № 1. С. 22–27.

Миронов В.С. Курс гравиразведки. 2-е изд, перераб. и доп. Л.: Недра, 1980. 543 с.

Старостенко В.И., Манукян А.Г., Заворотько А.Н. Методы решения прямых задач гравиметрии и магни-

Из данных табл. 2 следует, что хотя увеличение уровня шума увеличивает погрешность определения расчетных параметров, но в меньшей степени; с увеличением же радиуса сферы вклад шумовой компоненты незначительно увеличивается. Относительная погрешность определения глубины только для случая уровня шума 15% на сфере с радиусом 6371 км не превышает 15%. С точки зрения гравиразведки это весьма неплохой результат: точность определения глубин по МХТ на плоскости обычно оценивается в 10–20%. Таким образом, можно заключить, что разработанный метод, несмотря на отсутствие дополнительных процедур по фильтрации исходных данных, достаточно устойчив к шуму.

**Заключение.** Показано выражение, на основе которого можно определять положение точечного источника внутри сферы по распределению аномального гравитационного потенциала или аномалий силы притяжения на ней. По результатам сравнения параметров аномалиеобразующих тел, определенных с учетом и без учета сферичности, показано, что неучет сферичности может приводить к значительным ошибкам. Устойчивость метода к помехам растет с увеличением радиуса сферы. Для условий Земли наличие помех на уровне 15% приводит к ошибке определения глубины источника не более 15%.

тометрии на шарообразных планетах. Киев: Наукова думка, 1986. 112 с.

Kato M., Sasaki S., Takizawa Y. The Kaguya mission overview // Space Sci. Rev. 2010. Vol. 154, N 1–4. P. 3–19.

Save H., Bettadpur S., Tapley B.D. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons: HIGH-RESOLUTION CSR GRACE RL05 MASCONS // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. Vol. 121, N 10. P. 7547–7569.

Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M. et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results: GRACE mission overview and early results // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31, N 9. P. 1–4.

Wiese D.N., Landerer F.W., Watkins M.M. Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution: GRACE JPL RL05M leakage error reduction // Water Resour. Res. 2016. Vol. 52, N 9. P. 7490–7502.

Zuber M.T., Smith D.E., Watkins M.M. et al. Gravity field of the moon from the gravity recovery and interior laboratory (GRAIL) mission // Science. 2013. Vol. 339, N 6120. P. 668–671.

Поступила в редакцию  
 Поступила с доработки  
 Принята к публикации

УДК 550.831,838; 551.241

А.А. Шайхуллина<sup>1</sup>, Е.П. Дубинин<sup>2</sup>, А.А. Бульчев<sup>3</sup>, Д.А. Гилод<sup>4</sup>

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ ТЕКТОНОСФЕРЫ ПОДНЯТИЙ КОНРАД И АФАНАСИЯ НИКИТИНА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ (ИНДИЙСКИЙ ОКЕАН)

Выполнено двумерное плотностное моделирование по профилям, пересекающим подводные горы поднятия Конрад (Лена, Обь и Марион Дюфре), которые находятся в юго-западной части Индийского океана, и поднятия Афанасия Никитина, расположенного в центральной части Индийского океана. По предположениям ряда исследователей подводная гора Марион Дюфре и поднятие Афанасия Никитина образовались в результате действия горячей точки 83–73 млн лет назад. Результаты двумерного плотностного моделирования показали сходное строение коры и литосферы, что подтверждает вероятность их одновременного образования 83–73 млн лет назад в результате действия единой горячей точки. Кроме того, на основании полученных результатов подтверждается предположение, что подводные горы Лена и Обь на поднятии Конрад сформировались впоследствии за счет возобновления деятельности горячей точки под Антарктической плитой.

*Ключевые слова:* потенциальные поля, земная кора, поднятия Конрад и Афанасия Никитина, Индийский океан.

A two-dimensional density modeling is performed for profiles crossing the seamounts of the Conrad Rise (Lena, Ob and Marion Dufresne), which are located in the southwestern part of the Indian Ocean and the Afanasy Nikitin Rise, which is located in the central part of the Indian Ocean. According to the assumptions of a number of researchers, the seamount Marion Dufresne and the Afanasy Nikitin Rise were formed as a result of the hotspot 83–73 million years ago. The results of two-dimensional density modeling showed a similar structure of the crust and lithosphere, which confirms the probability of their formation 83–73 million years ago as a result of the action of a single hotspot. Also on the basis of the obtained results, the assumption is confirmed that the seamounts Lena and Ob of the Conrad Rise were formed afterwards due to the continuation of the action of the hotspot under the Antarctic Plate.

*Key words:* potential fields, earth crust, Conrad and Afanasy Nikitin Rises, the Indian ocean.

**Введение.** Работа продолжает серию статей авторского коллектива, посвященных изучению подводных поднятий Индийского океана [Бульчев и др., 2013, 2015, 2016; Шайхуллина и др., 2018а, б].

Поднятие Конрад включает в себя цепь подводных гор Обь, Лена и Марион Дюфре, которая протягивается между 40° и 53° в.д. с северо-запада на юго-восток в юго-западной части Индийского океана между котловинами Эндерби и Крозе. Подводные горы Обь и Лена сложены базальтами двух серий — субщелочной трахибазальт-трахитовой и щелочной базанит-тефритовой [Борисова, 1997]. Поднятие Афанасия Никитина расположено в Центральной котловине Индийского океана между 82° и 84° в.д. и представляет собой протяженную в меридиональном направлении магматическую структуру длиной около 400 км и шириной около 150 км, с многочисленными подводными горами

вулканического происхождения (рис. 1, 2). Плато, на котором формировались вулканические постройки, сложено оливин-порфиоровыми базальтами, сменяющимися вверх по склону породами базальт-трахибазальтовой серии [Борисова, 1997; Mahoney et al., 1996; Borisova et al., 2001].

**Материалы и методы исследований.** В работе использованы новейшие глобальные модели и компиляции: цифровые модели рельефа дна GEBCO [Weatherall et al., 2015], гравитационного поля и его градиента [Sandwell et al., 2014], магнитного поля [Maus et al., 2009], глобальная модель эволюции границ плит [Matthews et al., 2016].

На сегодняшний день предполагается, что подводные горы Марион Дюфре, Лена и Обь поднятия Конрад и основание поднятия Афанасия Никитина сформировались в результате действия горячей точки 83–73 млн лет назад вблизи Индо-

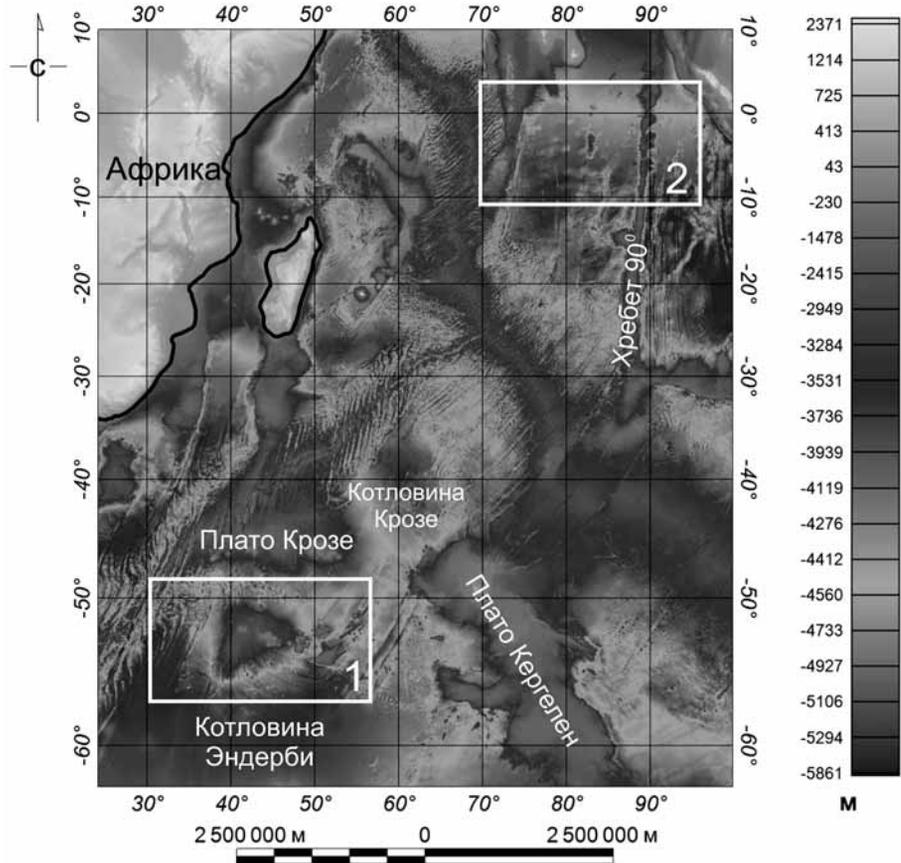
<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирантка; *e-mail:* anzhela.shaiikhullina@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей землеведения, заведующий сектором геодинамики Музея землеведения МГУ; *e-mail:* edubinin08@rambler.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, заведующий кафедрой; *e-mail:* aabul@geophys.geol.msu.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, науч. С.; *e-mail:* gilod\_dolores@mail.ru

Рис. 1. Обзорная схема изучаемых структур на батиметрической основе (прямоугольники — районы исследования): 1 — область поднятия Конрад; 2 — область поднятия Афанасия Никитина



Антарктического спредингового хребта [Krishna et al., 2014]. В начальной фазе спрединга под воздействием горячей точки образовалась подводная гора Марион Дюфре на Антарктической плите, а затем — плато поднятия Афанасия Никитина на Индийской плите. После этого горячая точка вновь сместилась под Антарктическую плиту, образовав подводные горы Обь и Лена. Основание поднятия Афанасия Никитина осталось изолированной структурой на Индийской плите, на которой за счет последующего вулканизма возникли плосковершинные горы — гайоты [Krishna et al., 2014]. Впоследствии поднятие Афанасия Никитина в палеоцене под воздействием горячей точки Кергелен перемещалась к северу в составе Индийской плиты [Krishna, 2003].

**Результаты исследований и их обсуждение.**

В таблице приведены геолого-геофизические параметры для подводных гор поднятия Конрад и поднятия Афанасия Никитина. Показано, что как для подводной горы Марион Дюфре, так и для поднятия Афанасия Никитина характерны среднее значение аномалий силы тяжести в редукции Буге (~240 мГал) и линейные магнитные аномалии северо-западного простирания [Maus et al., 2009].

Кроме того, на основе современных геолого-геофизических данных выполнено двумерное плотностное моделирование по профилям, пересекающим подводные горы поднятия Конрад и поднятие Афанасия Никитина (рис. 2, 3). Модели

включают в себя пять основных слоев. Первый слой — водный, подошва которого определяется рельефом дна (плотность 1,03 г/см<sup>3</sup>). Второй слой — осадочный, его мощность определена по данным [Whittaker et al., 2013] (плотность 2 г/см<sup>3</sup>). Третий слой — слой океанической коры, подошва которой определяется границей Мохо (переменная плотность от 2,6 до 2,8 г/см<sup>3</sup>). Четвертый слой — слой подкоровой литосферы (плотность 3,31–3,33 г/см<sup>3</sup>) с подошвой, глубина которой рассчитана по аналитической зависимости «возраст дна — мощность литосферы» [Лукашевич, Приставакина, 1984; Muller et al., 2008]. Пятый слой — астеносфера (плотность 3,3 г/см<sup>3</sup>). Переходный слой между подкоровой литосферой и океанической корой (плотность 3 г/см<sup>3</sup>) при моделировании по профилям, пересекающим поднятие Афанасия Никитина и подводные горы Марион Дюфре и Лена (профили 1, 2 и 4 соответственно), а также по профилю 3, пересекающему подводную гору Лена, разделен на два слоя с значениями плотности 2,9 и 3,1 г/см<sup>3</sup>, что суммарно создает тот же эффект, что и объединенный слой.

По результатам двумерного плотностного моделирования тектоносферы поднятий Конрад и Афанасия Никитина подводная гора Марион Дюфре и поднятие Афанасия Никитина имеют схожее строение: мощность коры составляет около 15 км, а граница литосферы прослеживается на глубине 75 км. Подводные горы Обь и Лена

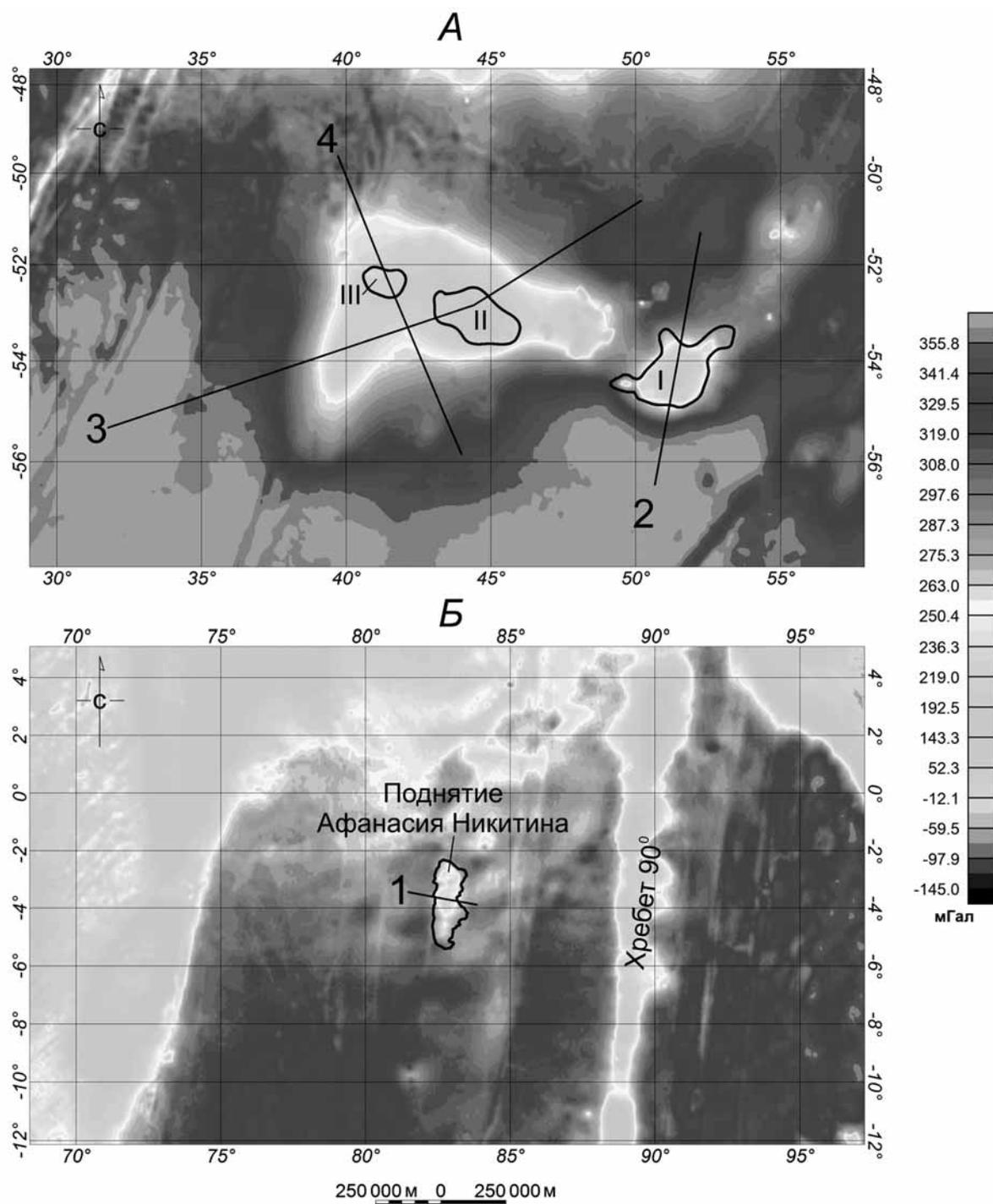


Рис. 2. Карты аномалий Буге с указанием расположения профилей двумерного плотностного моделирования, приведенных на рис. 3: А — область поднятия Конрад; Б — область поднятия Афанасия Никитина. Подводные горы поднятия Конрад: I — Марион Дюфре; II — Лена; III — Обь

также имеют схожее строение, но отличаются от подводной горы Марион Дюфре и поднятия Афанасия Никитина большей мощностью коры (20–25 км), граница литосферы расположена на глубине 80 км.

**Заключение.** Таким образом, на основании геолого-геофизических данных и двумерного плотностного моделирования можно сделать вывод о том, что поднятие Афанасия Никитина и подводная гора Марион Дюфре имеют схожее строение.

Это подтверждает предположения, сделанные в работах [Krishna, 2003; Krishna et al., 2014], о том, что эти структуры сформировались в одно время и вблизи спредингового хребта. Утолщенная кора подводных гор Лена и Обь подтверждает предположение, что после образования поднятия Афанасия Никитина и подводной горы Марион Дюфре горячая точка продолжала действовать под Антарктической плитой, в результате чего они образовались на общем основании.

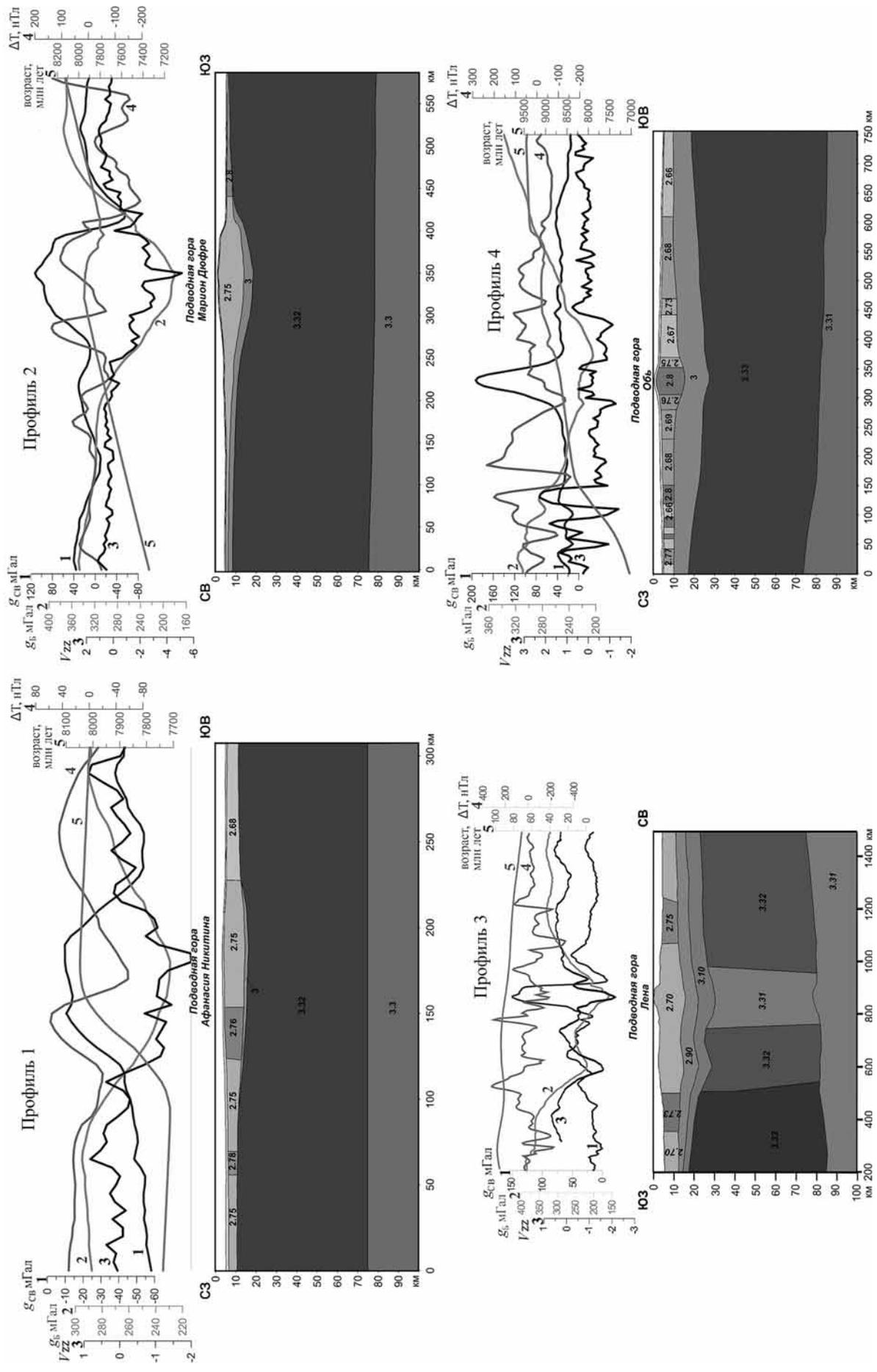


Рис. 3. Результаты двумерного плотностного моделирования по профилям пересекающим подводную гору Афанасия Никитина (1) и поднятие Конрад: Марион Дюфре (2), Лена (3) по [Булычев и др., 2015], Обь (4). Местоположение профилей показано на рис. 2. Графики над моделями (номер кривой соответствует номеру шкалы): 1 — аномалии силы тяжести в свободном воздухе ( $\Delta g_{св}$ , мГал); 2 — аномалии в редукции Буге ( $\Delta g_B$ , мГал); 3 — вертикальный градиент силы тяжести ( $V_{zz}$ , Э); 4 — аномальное магнитное поле ( $\Delta T$ , нТл); 5 — возраст океанического дна в млн лет

## Геолого-геофизические параметры поднятий Конрад и Афанасия Никитина

Поднятие/ параметры	Подводные горы поднятия Конрад			Поднятие Афанасия Никитина
	Обь	Лена	Марион Дюфре	
Тип коры	океаниче- ская	океаниче- ская	океани- ческая	океаниче- ская
Возраст, млн лет, по [Muller et al., 2008]	80			75÷90
Мощность осадков, м, по [Whittaker et al., 2013]	850	800÷820	400÷600	300÷1000
Мощность земной коры, км	16	17÷22	13÷15	9÷13
$\Delta g_B^1$ , мГал	195÷240 (222)	137÷240 (180)	175÷285 (240)	226÷280 (240)
Высоко- частотная компонента (Буге) <sup>2</sup> , Э	-2,8÷2,2 (-0,05)	-10,4÷6,6 (-1,4)	-13,4÷1,9 (-1,2)	-2,1÷1,7 (-1,1)
Средне- частотная компонента (Буге) <sup>3</sup> , мГал	-22,7÷- 17,9 (-20,8)	-28,4÷- 16,9 (-26)	-17,4÷0,7 (-9,6)	-7,8÷0 (-4,3)

**Благодарности.** Авторы благодарят Н.М. Сушевскую, В.А. Рашидова и О.М. Сусанину за полезные советы и рекомендации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Борисова А.Ю.* Геохимия и петрология магматизма поднятия Афанасия Никитина и подводных гор Обь и Лена поднятия Конрад (Индийский океан): Автореф. канд. дисс. М., 1997.

*Бульчев А.А., Гилод Д.А.* Двумерное плотностное моделирование тектоносферы структур юго-западного сектора акватории Индийского океана // Геофизика. 2013. № 1. С. 55–66.

*Бульчев А.А., Гилод Д.А., Дубинин Е.П.* Двумерное структурно-плотностное моделирование строения тектоносферы акватории южной части Индийского океана // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С. 15–35.

*Бульчев А.А., Гилод Д.А., Дубинин Е.П.* Строение литосферы северо-восточной части Индийского океана по результатам двумерного структурно-плотностного моделирования // Геотектоника. 2016. № 3. С. 42–62. DOI:10.7868/S0016853X16030048

*Лукашевич И.П., Приставакина Е.И.* Плотностная модель верхней мантии под океанами // Физика Земли. 1984. № 2. С. 103–107.

*Шайхулина А.А., Дубинин Е.П., Бульчев А.А., Гилод Д.А.* Тектоносфера плато Кергелен по геофизическим данным // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2018а. Т. 37, № 1. С. 43–50.

*Шайхулина А.А., Дубинин Е.П., Бульчев А.А., Гилод Д.А.* Тектоносфера поднятий Крозе и Конрад по геофизическим данным // Геофизика. 2018б. № 2. С. 44–51.

Поднятие/ параметры	Подводные горы поднятия Конрад			Поднятие Афанасия Никитина
	Обь	Лена	Марион Дюфре	
Тип коры	океаниче- ская	океаниче- ская	океани- ческая	океаниче- ская
Низкоча- стотная компонента (Буге) <sup>4</sup> , мГал	295÷299 (297)	292÷298 (295)	288÷302 (295)	279÷293 (280)
Распре- деление аномалий магнитного поля	линейные аномалии северо-за- падного простирания			линейные аномалии северо-за- падного простира- ния

Примечания. <sup>1</sup> Для аномалий силы тяжести в редукции Буге приведены экстремальные значения (минимум–максимум); <sup>2</sup> высокочастотная компонента — поле вертикального градиента аномалий силы тяжести в редукции Буге на уровне 0 км (приведены экстремальные значения (минимум–максимум)); <sup>3</sup> среднечастотная компонента (поле разностных аномалий), полученная путем пересчета аномалий силы тяжести в редукции Буге вверх на 75 и 150 км (приведены экстремальные значения (минимум–максимум)); <sup>4</sup> низкочастотная компонента — пересчет поля аномалий силы тяжести в редукции Буге вверх на 200 км (приведены экстремальные значения (минимум–максимум)). В скобках везде — среднее значение.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00127).

*Borisova A. Yu., Belyatsky B. V., Portnyagin M. V., Sushchevskaya N. M.* Petrogenesis of an olivine-phyric basalts from the Aphanasey Nikitin Rise: evidence for contamination by cratonic lower continental crust // J. Petrol. 2001. Vol. 42. P. 277–319.

*Krishna K.S.* Structure and evolution of the Afanasy Nikitin seamount, buried hills and 85°E Ridge in the northeastern Indian Ocean // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 209. Iss. 3–4. P. 379–394.

*Krishna K.S., Bull J.M., Ishizuka O.* et al. Growth of the Afanasy Nikitin seamount and its relationship with the 85°E Ridge, northeastern Indian Ocean // J. Earth Syst. Sci. 2014. Vol. 123, N 1. P. 33–47.

*Mahoney J.J., White W.M., Upton B.G.J.* et al. Beyond EM-1: Lavas from Afanasy–Nikitin Rise and the Crozet Archipelago, Indian Ocean // Geology. 1996. Vol. 24, N 7. P. 615–618.

*Matthews K.J., Maloney K.T., Zahirovic S.* et al. Global plate boundary evolution and kinematics since the late Paleozoic // Global and Planet. Change. 2016. Vol. 146. P. 226–250. DOI:10.1016/j.gloplacha.2016.10.002

*Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H.* et al. EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem., Geophys., Geosyst. 2009. Vol. 10, N 8. 12 p.

*Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.* Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean

crust // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2008. Vol. 9, N 4. 19 pp. DOI:10.1029/2007GC001743.

*Sandwell D.T., Muller R.D., Smith W.H.F.* et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science*. 2014. Vol. 346, N 6205. P. 65–67. DOI: 10.1126/science.1258213. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/>, <http://topex.ucsd.edu>. (дата обращения: 12.09.2018)

*Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M.* et al. A new digital bathymetric model of the world's oceans //

*Earth and Space Sci.* 2015. Vol. 21, N 2. P. 331–345. DOI:10.1002/2015EA000107.

*Whittaker J.M., Goncharov A., Williams S.E.* et al. Global sediment thickness data set updated for the Australian–Antarctic Southern Ocean // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2013. Vol. 14, N 8. P. 3297–3305. DOI:10.1002/ggge.20181.

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации

УДК 552.13:552.16

И. Лю<sup>11</sup>, А.Л. Перчук<sup>1,2 \*2</sup>, Н.Г. Зиновьева<sup>13</sup>

## СВИДЕТЕЛЬСТВО КУМУЛУСНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ЛОКАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭКЛОГИТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА В ОЛИВИНОВОМ ГАББРО КОМПЛЕКСА МАРУН-КЕУ, ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ

Приведены результаты детального петрологического исследования меланократового оливинового габбро, частично преобразованного при эклогитовом метаморфизме. В породе установлены структурные признаки кумулузной кристаллизации на магматическом этапе. Наибольшим изменениям во время эклогитового метаморфизма подверглись плагиоклазы, по которым развивается мелко-скрытозернистый агрегат, сложенный минералами высокобарного парагенезисом. На этом же этапе по периферии плагиоклазовых (фельзитических) доменов на контактах с (Fe, Mg)-минералами сформировались коронарные структуры. Минеральная термобарометрия и метод моделирования фазовых равновесий показали близкие параметры метаморфизма – температуру  $T=680\pm 60$  °С, давление  $P=2,2\pm 0,4$  ГПа, соответствующие установленным нами ранее условиям образования эклогитов и гранат-амфиболового перидотита из этого же комплекса.

*Ключевые слова:* эклогитовый метаморфизм, габбро, кумулат, коронарная структура, Полярный Урал, Марун-Кеу.

The paper presents the results of a detailed petrological study of olivine gabbro transformed to different extent by eclogite-facies metamorphism. Textural features of cumulate crystallization in the rock are presented. Plagioclases underwent the greatest alteration and replaced by fine-grained aggregate during eclogite-facies metamorphism. Corona textures are developed along the boundaries of the plagioclase (felsic) domains at the contacts with (Fe, Mg)-minerals during eclogite facies event. The mineral thermobarometry and phase equilibrium modeling provide  $P-T$  metamorphic conditions in relatively narrow range of temperature  $680\pm 60$  °С and pressure  $P=2,2\pm 0.4$  GPa. This is in a good agreement with the previously established conditions for the formation of eclogites and garnet-amphibole peridotite from the same complex.

*Key words:* eclogite-facies metamorphism, gabbro, cumulate, corona texture, Polar Urals, Marun-Keu.

**Введение.** Высокобарный метаморфический комплекс Марун-Кеу площадью около 300 км<sup>2</sup> находится на Полярном Урале. Сведения о его геологическом строении и геохимических особенностях пород можно найти в немногочисленных публикациях [Удовкина, 1971, 1985; Куликова, 2005; Уляшева, Ронкин, 2014; Molina et al., 2002; Glodny et al., 2003]. Породы южной и центральной частей комплекса в основном состоят из кварц-полевошпатовых ортогнейсов и мигматитов, которые содержат линзы, будины и пластообразные тела габброидов и перидотитов, локально перекристаллизованных на участках проникновения флюида в условиях эклогитовой фации метаморфизма с образованием эклогитов, гранатовых перидотитов и переходных разностей от магматических пород к метаморфическим [Удовкина, 1971; Molina et al., 2002]. Возраст эклогитового метаморфизма по результатам изотопного датирования (Sm-Nd, Rb-Sr и U-Pb) составляет 366–352 млн. лет [Шацкий и

др., 2000; Glodny et al., 2003, 2004]. Большинство петрологических исследований комплекса было посвящено эклогитам. По результатам этих исследований с использованием минералогической геотермобарометрии были получены следующие пиковые условия эклогитового метаморфизма в комплексе Марун-Кеу  $T=600-750$  °С и  $P=1,3-1,7$  ГПа [Шацкий и др., 2000; Molina et al., 2002]. Применение методов мультиминеральной термобарометрии и моделирования фазовых равновесий позволило скорректировать  $P-T$  параметры в сторону увеличения давления ( $T\sim 685-745$  °С,  $P\sim 1,89-2,13$  ГПа) и впервые для этих пород установить активность воды во флюиде  $a_{\text{H}_2\text{O}} \sim 0,6-1$  [Liu et al., 2018].

Ассоциирующие с эклогитами ультраосновные породы начали изучаться современными методами лишь недавно. Так, А.Ю. Селятицкий и К.В. Куликова [2017] с помощью гранат-ортопироксеновой термобарометрии установили ультравысокобарные

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, аспирант; *e-mail:* yingyuan1990@gmail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, профессор, зав. кафедрой, докт. геол.-минерал. н.; Институт экспериментальной минералогии РАН имени Д.С. Коржинского; *e-mail:* alp@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, зав. лабораторией, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* nzinov@mail.ru

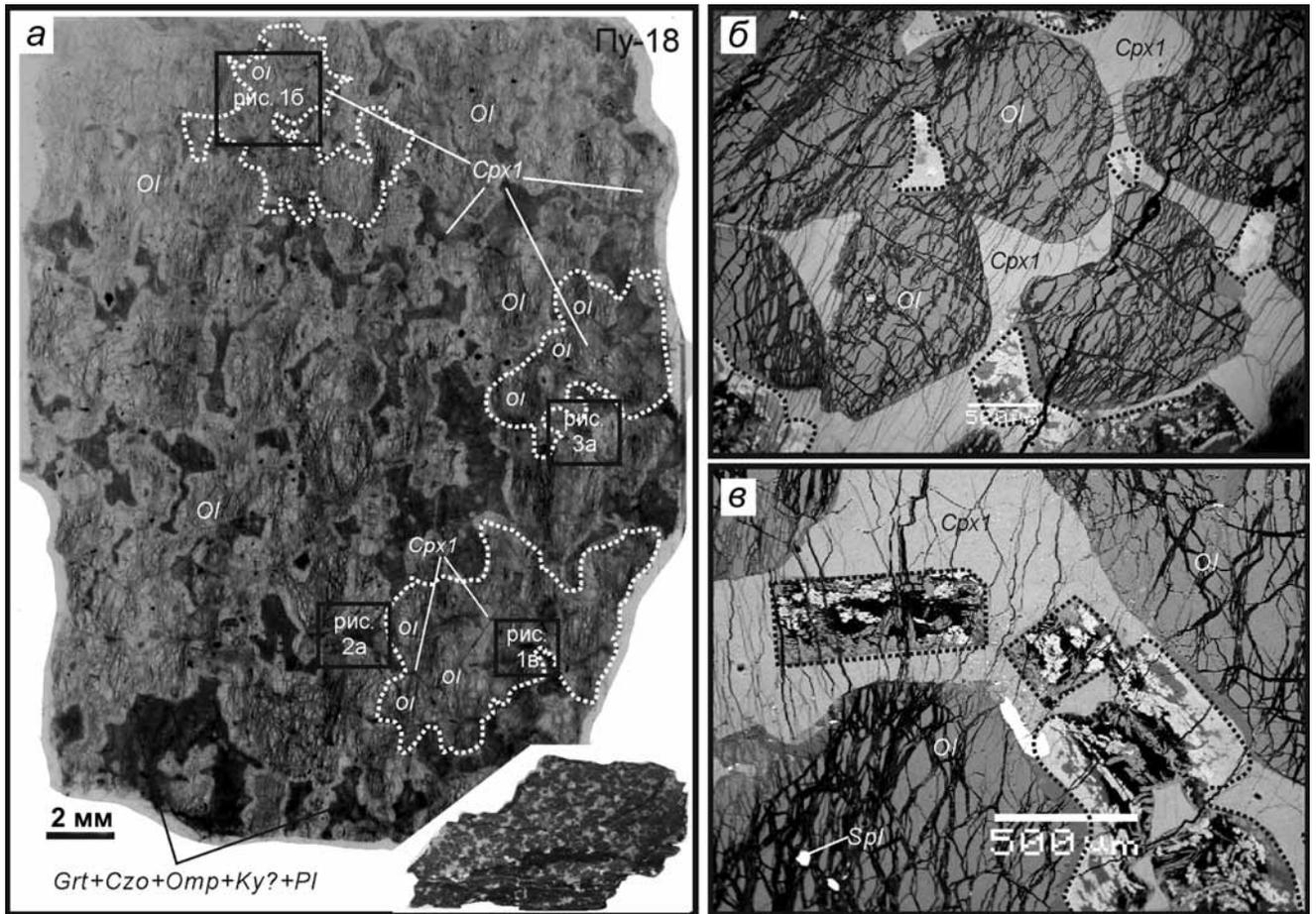


Рис. 1. Панорама шлифа и структурные особенности породы: *а* — отсканированный шлиф, на котором выделены участки изображений в отраженных электронах, представленные на других рисунках, белые точечные линии — границы фенокристов клинопироксена с округлыми включениями оливина, на врезке — фото образца; *б* — округлые включения магматического оливина в фенокристалле магматического клинопироксена (*Cpx1*), рассматриваемые как признак кумулюсной структуры; *в* — псевдовключения разной формы (таблитчатые, округлые и др.), выполненные симплектиты по плагиоклазу (*Pl*) в магматическом клинопироксене, черные пунктирные линии — границы областей развития симплектитов в плагиоклазовом (фельзитическом) домене

*P-T* условия ( $P \sim 3,9$  ГПа и  $T \sim 830$  °С) эклогитового метаморфизма перидотитов. По нашему мнению, эти оценки являются завышенными (см. аргументацию в статье [Лю и др., 2019]). Предлагаемые новые параметры  $P \sim 2,1$  ГПа,  $T \sim 640-740$  °С, хорошо согласующиеся с *P-T* условиями образования эклогитов [Liu et al., 2018], получены для представительного образца гранат-амфиболового лерцолита с использованием методов минеральной термобарометрии и моделирования фазовых равновесий [Лю и др., 2019].

В работе [Лю и др., 2019] было также продемонстрировано наличие в гранат-амфиболовом лерцолите кумулюсной структуры, а петролого-геохимическое моделирование, выполненное для химических составов малоизмененных пород, показало, что наиболее распространенные магматические породы комплекса Марун-Кей — плагиоклазовые перидотиты, меланократовые оливиновые габбро и лейкократовые высокоглиноземистые габбро являются генетически связанными между собой. Ниже приводятся дополнительные свидетельства, подтверждающие корректность этого

вывода для представительного образца меланократового оливинового габбро. Кроме того, для этой породы рассматриваются структурные и минералогические особенности начальной стадии эклогитизации и результаты восстановления *P-T* условий ее развития.

**Материалы и методы исследования. Петрография.** Представительный образец — частично эклогитизированное меланократовое оливиновое габбро (обр. Пу-18) — был отобран в районе Слюдяной Горки комплекса Марун-Кей. Порода массивная, неравнозернистая, сложена минералами разных стадий ее эволюции (рис. 1, *а*). Главные породообразующие минералы магматической стадии представлены оливином (55 модалных %), клинопироксеном (15%), ортопироксеном (<5%) и в значительной степени измененный плагиоклаз (25%). Акцессорные минералы — шпинель, ильменит, сульфид (Fe-Ni) и апатит. Метаморфические минералы приурочены к разным структурным участкам породы и образуют: 1) симплектиты по частично сохранившему исходному плагиоклазу (плагиоклазовые домены)

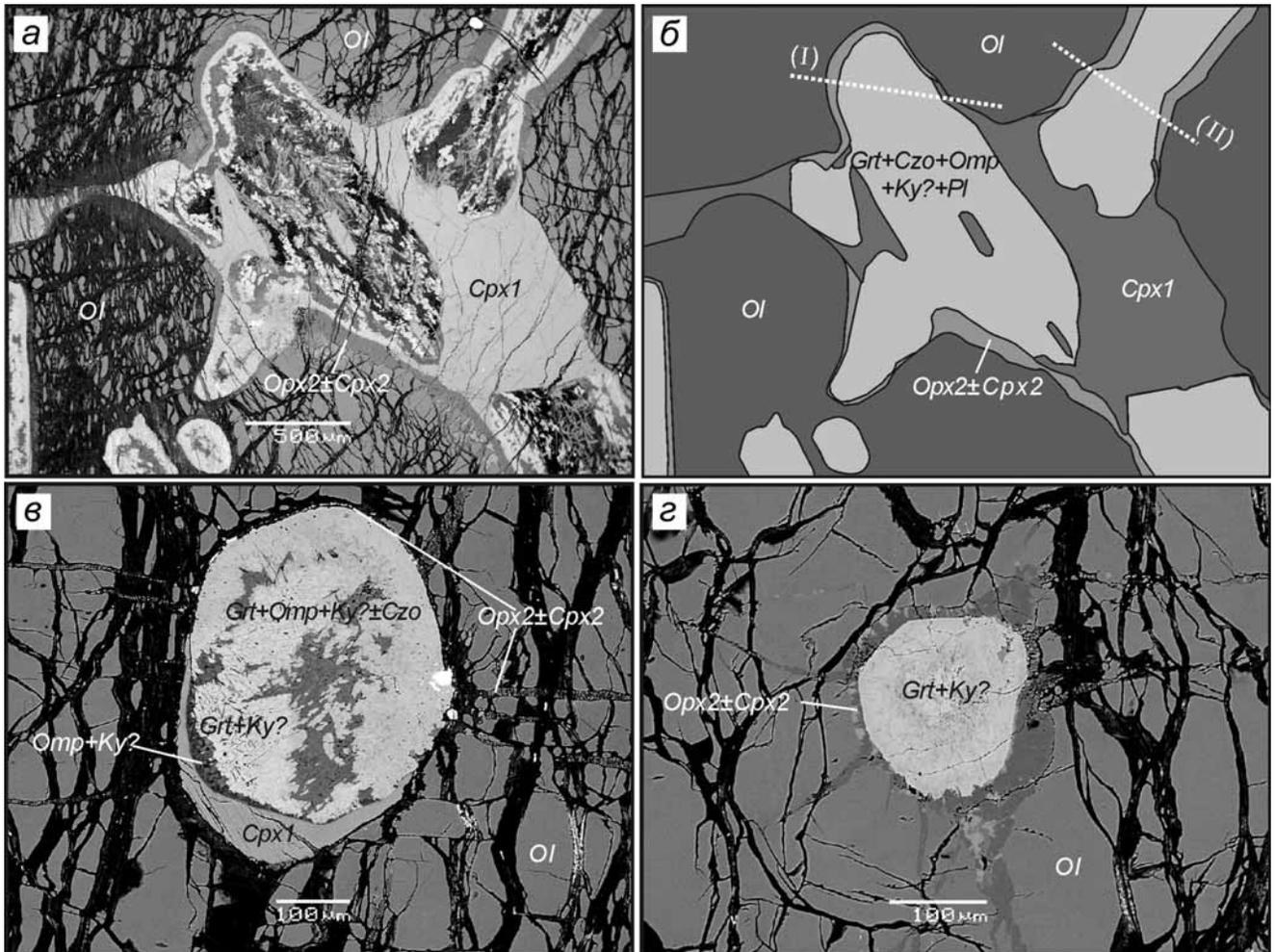


Рис. 2. Псевдовключения в оливинах оливинового габбро на изображениях в отраженных электронах: *а* — Амебовидная форма плагиоклазового домена, в котором развивается эклогитовый парагенезис ( $Grt+Czo+Omp+Ky$ ); *б* — схема рис. 2, *а*, белые пунктирные линии — гипотетические сечения I и II, при которых появятся аналоги псевдовключений, представленных на рис 2, *в* и *г* соответственно; *в* — псевдовключение в оливине, состоящее из симплектитов эклогитового парагенезиса  $Grt+Omp+Ky\pm Czo$  и неполных кайм магматического клинопироксена (снизу и слева) и метаморфического ортопироксена (вверху), вторичная жила ( $Opx2\pm Cpx2$ ) в оливине; *г* — Псевдовключение в оливине с каймой метаморфических клино- и ортопироксенов, состоящее из минералов эклогитового парагенезиса  $Grt+Ky$

состоят из граната, клиноцоизита, а также, предположительно (диагностика только по спектрам, зерна малы для анализа), кианита и омфацита (рис. 2, 3, *а*, *в*); 2) короны, выполненные новообразованными ортопироксеном, диопсидом, омфацитом, гранатом и предположительно кианитом на границе плагиоклазовых доменов с Fe-Mg минералами (рис. 3, *б*); 3) многочисленные тонкие регрессивные прожилки серпентина, иногда с хлоритом и кальцитом, образующие петельчатую структуру в оливине, пироксенах и симплектитах (рис. 1, *б*, *в*).

Кристаллы оливина размером до 4 мм находятся в матрице породы и часто имеют овальную форму. Наряду с этим, в крупных фенокристах клинопироксена встречаются многочисленные овальные включения оливина (рис. 1), что характерно для кумулюсных структур [Wager et al., 1960]. Магматические клинопироксены размером до 7 мм имеют, как правило, ксеноморфные очертания из-

за реакции с плагиоклазом. Для них характерны тонкие ламеллы распада твердого раствора, в то время как в метаморфических клинопироксенах ламеллы отсутствуют. Магматический ортопироксен встречается лишь в овальных псевдовключениях вместе с магматическим клинопироксеном и измененным плагиоклазом в оливине.

Плагиоклазовые домены имеют амебовидную форму, вследствие чего в оливине и пироксенах можно наблюдать округлые псевдовключения (эффект сечения шлифа), выполненные минералами плагиоклазового домена (рис. 2). В экзотическом псевдовключении в клинопироксене обнаружена таблитчатая форма первичного кристалла плагиоклаза (рис. 1, *в*).

Келифитовые каймы (короны) мощностью до 300 мкм развиваются на эклогитовой стадии вокруг плагиоклаза на границе с мафическими минералами. Типичная кайма на границе оливина с плагиоклазовым доменом состоит из следую-

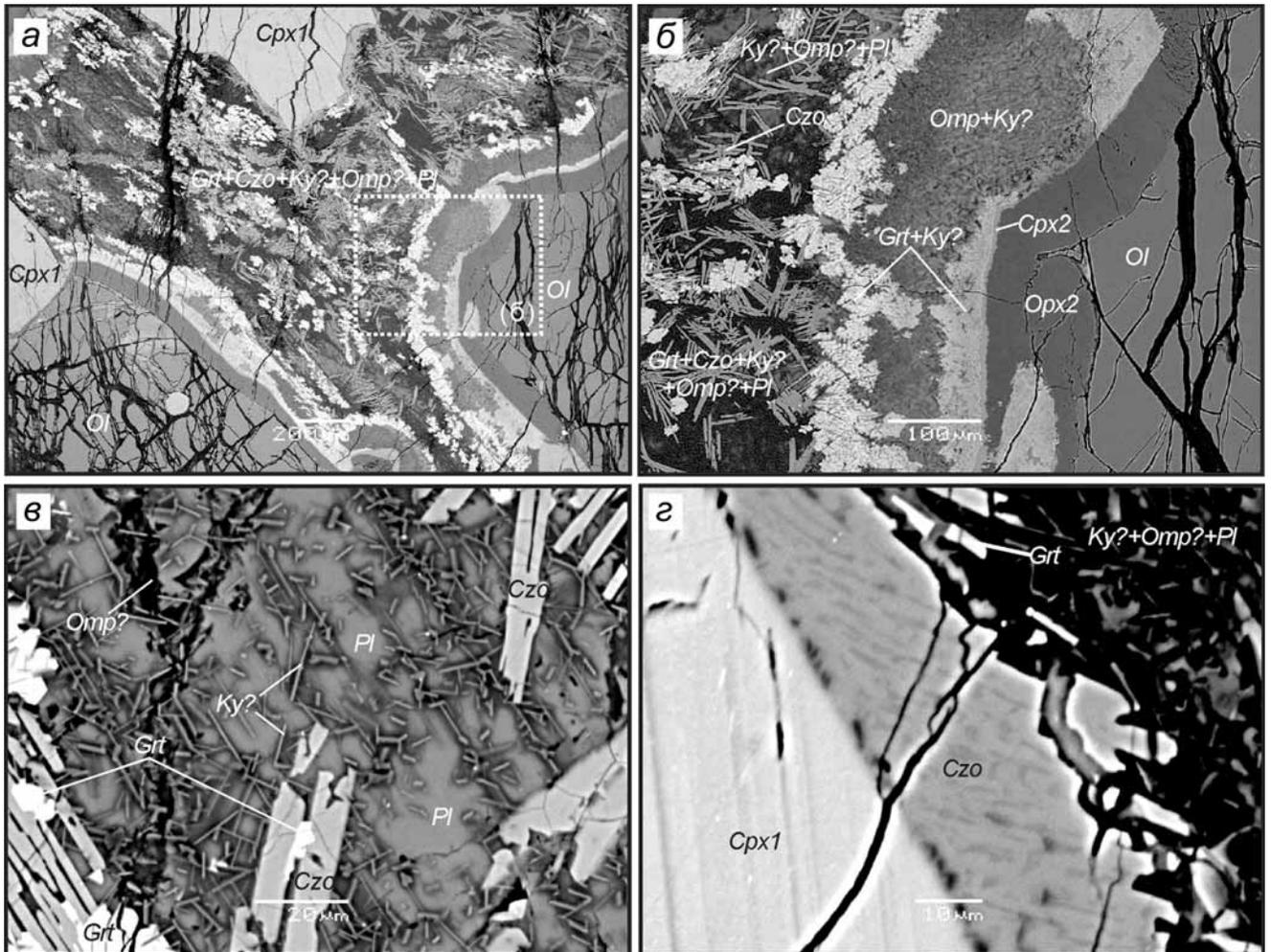


Рис. 3. Фрагменты метаморфических структур, развивающихся на начальной стадии эклогитизации меланократового оливинового габбро: *a* — общий вид келифитовых кайм вокруг плагиокалаза на контакте с магматическими оливинном и клинопироксеном, в рамке — участок следующей микрофотографии; *б* — увеличенное изображение участка, выделенное на рис. 3а, показывающее келифитовую кайму на границе плагиокалаза с оливинном со следующей зональностью:  $Ol | Opx2 \pm Cpx2 | Grt + Ky | Omp + Ky \pm Grt | Grt + Czo + Ky + Omp + Pl$ ; *в* — симплектиты  $Grt + Czo + Ky + Omp$  по плагиокалазу; *з* — келифитовые каймы вокруг плагиокалаза на контакте с клинопироксеном со следующей зональностью:  $Cpx1 | Czo \pm Grt | Ky + Omp + Pl \pm Grt \pm Czo$ . Клиноцоизоит содержит тонкие вставки Na-фазы (вероятно омфацита). Знак вопроса после символа минерала и далее означает, что минерал диагностировался по спектру с частичным захватом спектра соседнего минерала. Изображение в отраженных электронах

щих зон:  $Ol^1 | Opx2 \pm Cpx2 | Grt + Ky | Omp + Ky \pm Grt | Grt + Czo + Ky + Omp + Pl$  (рис. 3, *a, б*). На границе клинопироксена с плагиокалазовым доменом наблюдается несколько иная зональность:  $Cpx1 | Czo \pm Grt | Ky + Omp + Pl \pm Grt \pm Czo$ . В клиноцоизоите около магматического клинопироксена наблюдаются тонкие ламеллы Na-содержащего минерала (рис. 3, *з*), напоминающего по ЭДС-спектру омфацита.

**Минералогия.** Изучение состава минералов и структурных взаимоотношений между ними осуществлялось в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ с помощью электронно-зондового микроанализатора «Superprobe JXA-8230» с вольфрамовым термоэмиссионным катодом. Изображения в отраженных электронах получены при ускоряющем напряжении 20 кВ. В качестве стандартов для измерения главных

элементов использовали природные силикаты. Для главных элементов время накопления импульсов на пике составляло 30 с, на фоне — 15 с. Часть исследований выполнялась в той же лаборатории с помощью сканирующего электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV» с энергодисперсионным спектрометром «X-Max<sup>N</sup>». Изображения в отраженных электронах получены при ускоряющем напряжении 20 кВ. Локальный количественный энергодисперсионный анализ фаз выполнялся при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда 10 нА.

Определение химического состава породы осуществлялось с помощью рентгено-флуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре последовательного действия PW2400 производства компании «Philips Analytical» (Нидерланды) в Институте геологии рудных месторождений РАН, Москва (аналитик А.И. Якушев). При калибровке

<sup>1</sup> Символы минералов по [Whitney, Evans, 2010].

Таблица 1

**Представительные электронно-зондовые микроанализы оливина, плагиоклаза, клинопироксена и ортопироксена из эклогитизированного оливинового габбро, комплекс Марун-Кей**

	Минерал									
	<i>Ol</i>	<i>Ol</i>	<i>Pl</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx1</i>	<i>Cpx1</i>	<i>Cpx2</i>	<i>Cpx2</i>	<i>Opx</i>	<i>Opx</i>
Контакт с		<i>Opx2</i>	<i>Ky</i>	<i>Ky</i>	<i>Opx2</i>		<i>Opx2</i>	<i>Opx2</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>
Номер анализа	2_27	13_2	1_13	3_33	2_14	3_26	1_07	13_7	05	06
SiO <sub>2</sub>	39,84	40,98	47,88	47,78	52,87	52,47	54,48	54,58	49,93	48,70
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,59	0,28	0,00	0,02	0,12	0,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,05	33,12	33,05	3,00	3,46	0,59	0,61	18,59	17,94
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,04	0,00	0,00	1,02	1,12	0,00	0,02	0,03	0,04
FeO	13,32	12,99	0,00	0,00	2,68	4,36	2,22	2,37	2,21	2,52
MnO	0,18	0,16	0,00	0,00	0,07	0,19	0,09	0,09	0,04	0,03
MgO	46,28	46,38	0,00	0,00	16,72	17,72	17,82	17,53	7,61	8,12
NiO	0,29	0,27	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,03	0,06	0,05
CaO	0,00	0,00	15,43	15,39	23,26	20,42	24,34	24,58	17,22	18,59
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	2,47	2,42	0,37	0,31	0,19	0,21	4,76	3,85
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	99,91	100,86	98,97	98,71	100,67	100,33	99,73	100,03	100,58	100,00
X <sub>Mg</sub> *	0,86	0,86	**	—	0,93	0,90	0,96	0,95	0,87	0,87
X <sub>Jd</sub> <sup>Cpx</sup>	—	—	—	—	0,01	0,00	0,00	0,00	0,32	0,26

Примечания. \*X<sub>Mg</sub>=Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>), \*X<sub>Jd</sub><sup>Cpx</sup>=Na-Fe<sup>2+</sup>; \*\* — не рассчитывался; здесь и далее 0,00 — ниже предела обнаружения.

Таблица 1

**Представительные электронно-зондовые микроанализы ортопироксена и шпинели из эклогитизированного оливинового габбро, комплекс Марун-Кей**

	Минерал							
	<i>Opx1</i>	<i>Opx1</i>	<i>Opx2</i>	<i>Opx2</i>	<i>Opx2</i>	<i>Opx2</i>	<i>Spl</i>	<i>Spl</i>
Контакт с	<i>Cpx1</i>	<i>Opx</i>	<i>Cpx1</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Ol</i>	<i>Cpx</i>
Номер анализа	2_02	2_05	2_15	3_13*	3_21*	3_22*	1_05	2_32
SiO <sub>2</sub>	55,82	54,61	56,14	56,39	56,40	57,16	0,11	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,30	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15	0,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,78	2,14	1,68	0,87	0,91	0,91	13,02	23,46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,49	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	40,01	40,15
FeO	8,46	10,09	8,76	8,61	8,56	8,54	38,24	26,32
MnO	0,20	0,22	0,18	0,22	0,21	0,21	0,55	0,36
MgO	31,98	30,35	33,17	33,28	33,37	34,23	4,99	8,32
NiO	0,00	0,10	0,00	0,11	0,00	0,00	0,20	0,00
CaO	1,40	1,18	0,75	0,15	0,16	0,14	0,05	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	100,43	99,61	100,68	99,63	99,61	101,19	99,12	99,22
X <sub>Mg</sub> **	0,88	0,85	0,90	0,89	0,89	0,90	0,25	0,39

\* Анализы использовались в минеральной термобарометрии, а по *Opx2* (3\_13) и *Grt* (3\_03) восстанавливались *P-T* условия при моделировании с помощью *Perple\_X*; \*\*X<sub>Mg</sub>=Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>).

спектрометра использованы отраслевые и государственные стандартные образцы химического состава горных пород.

Представительные микронзондовые анализы минералов и их кристаллохимические формулы приводятся в табл. 1, 2 и 3. Валовой состав породы приводится в табл. 4.

*Оливин* представлен реликтовыми магматическими кристаллами, имеющими выдержанный состав по X<sub>Mg</sub>=100×Mg/(Mg+Fe) = 86÷87, MnO=0,12÷0,21 масс.% и NiO=0,19–0,36 масс.%.

Концентрация NiO в большинстве оливинов ниже, чем в типичных первичных оливинах мантии [Takahashi et al. 1987] (рис. 4, а).

*Клинопироксены*, образованные на разных этапах, очень сильно отличаются один от другого по составу (табл. 1, рис. 4, б, в). Магматические клинопироксены представлены авгитом (X<sub>Mg</sub>=89÷92), кристаллы в целом гомогенные, лишь около границы с плагиоклазовыми доменами наблюдается повышение содержаний SiO<sub>2</sub>, CaO и Na<sub>2</sub>O и снижение FeO и MgO. Метамор-

Таблица 3

Представительные электронно-зондовые микроанализы граната из эклогитизированного оливинового габбро, комплекс Марун-Кей

	Минерал							
	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>
Контакт с	<i>Opx2</i> (3_13)	<i>Opx2</i> (3_21)	<i>Opx2</i> (3_22)	<i>Omp</i>	<i>Omp</i>	<i>Czo</i>	<i>Czo</i>	<i>Czo</i>
Номер анализа	3_03*	3_05*	3_06*	05	07	13_14	14_1	14_2
SiO <sub>2</sub>	39,79	39,33	41,09	39,31	39,42	39,49	39,52	39,90
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,05	0,05	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,20	24,19	23,72	22,79	22,83	24,02	23,43	23,62
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
FeO	15,07	14,32	14,96	10,61	10,07	5,72	2,20	2,58
MnO	1,28	1,06	1,01	0,36	0,32	0,12	0,00	0,04
MgO	13,86	13,82	14,97	3,94	4,51	2,03	0,77	0,83
CaO	5,80	6,62	5,40	23,25	22,63	29,02	33,83	33,52
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	99,00	99,34	101,15	100,29	99,80	100,48	99,81	100,55
X <sub>Mg</sub> **	0,64	0,66	0,65	0,42	0,45	0,39	0,38	0,36
X <sub>Prp</sub> <sup>Grt***</sup>	0,52	0,52	0,54	0,15	0,17	0,08	0,03	0,03
X <sub>Grs</sub> <sup>Grt</sup>	0,16	0,18	0,14	0,63	0,61	0,80	0,92	0,91

\* Анализы использованы в минеральной термобарометрии; \*\* X<sub>Mg</sub>=Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>); \*\*\* X<sub>Prp</sub><sup>Grt</sup>=Mg/(Fe<sup>2+</sup>+Mn+Mg+Ca); \*\*\*\* X<sub>Grs</sub><sup>Grt</sup>=Ca/(Fe<sup>2+</sup>+Mn+Mg+Ca).

Таблица 4

Валовой состав эклогитизированного оливинового габбро с помощью рентгено-флуоресцентного анализа (XRF), комплекс Марун-Кей

Единицы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>общ.</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S <sup>общ.</sup>	ППП*	Сумма			
мас.%	42,19	0,09	11,85	9,52	0,15	25,56	6,67	0,72	0,16	0,03	0,06	2,32	99,32			
	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	U	Th	Y	Nb	Pb	As
ppm	1838	22	90	1671	108	59	41	180	23	69	<5	<5	<10	<10	396	88

\* ППП — потери при прокаливании.

фические клинопироксены представлены омфацитом (X<sub>Jd</sub>=0,25÷0,32, X<sub>Mg</sub>=87÷91) и диопсидом (X<sub>Mg</sub>=94÷98, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <0,8 масс.%). Состав клинопироксенов разных генераций заметно отличается, что можно наблюдать на пироксеновой трапеции с изотермами (рис. 4, б). На этой диаграмме хорошо видно, что магматические разности более высокотемпературные, чем представленные здесь метаморфические.

Химический состав магматических ортопироксенов также заметно отличается от метаморфических пониженным содержанием SiO<sub>2</sub> и MgO и повышенным Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO (табл. 1, рис. 4, з). Магматический ортопироксен около реакционной зоны обогащен Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO, обеднен SiO<sub>2</sub>, MgO. Метаморфический ортопироксен на контакте с магматическим клинопироксеном имеет повышенное содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 2).

Плагиоклаз, сохраняющийся на неизменных симплектитах участках, представлен битовнитом (An<sub>77.2-77.5</sub>, Ab<sub>22.1-22.4</sub>, Or<sub>0.4</sub>).

Состав шпинели в оливине отличается от шпинели в магматическом клинопироксене пониженной магнезиальностью и повышенной хромистостью (табл. 2).

Гранат — метаморфический минерал. Его химический состав зависит от структурного положения. Гранат, контактирующий в реакционной кайме с новообразованным ортопироксеном, существенно пироповый (Grs<sub>14-22</sub>, Prp<sub>49-54</sub>, Alm<sub>27-33</sub>), а гранат из симплектиста обогащен гроссуляром (Grs<sub>62-95</sub>, Prp<sub>2-17</sub>, Alm<sub>3-22</sub>). От центра плаггиоклазового домена к краю (короне) наблюдается значительное снижение содержания гроссуляра (рис. 5, табл. 3).

Состав клиноцоизита из-за малых размеров устанавливается лишь на полуколичественном уровне и потому в таблицах не приводится.

Восстановление P-T условий метаморфизма. P-T параметры эклогитового метаморфизма восстанавливались с помощью метода моделирования фазовых равновесий, а также на основе классической минеральной термобарометрии.

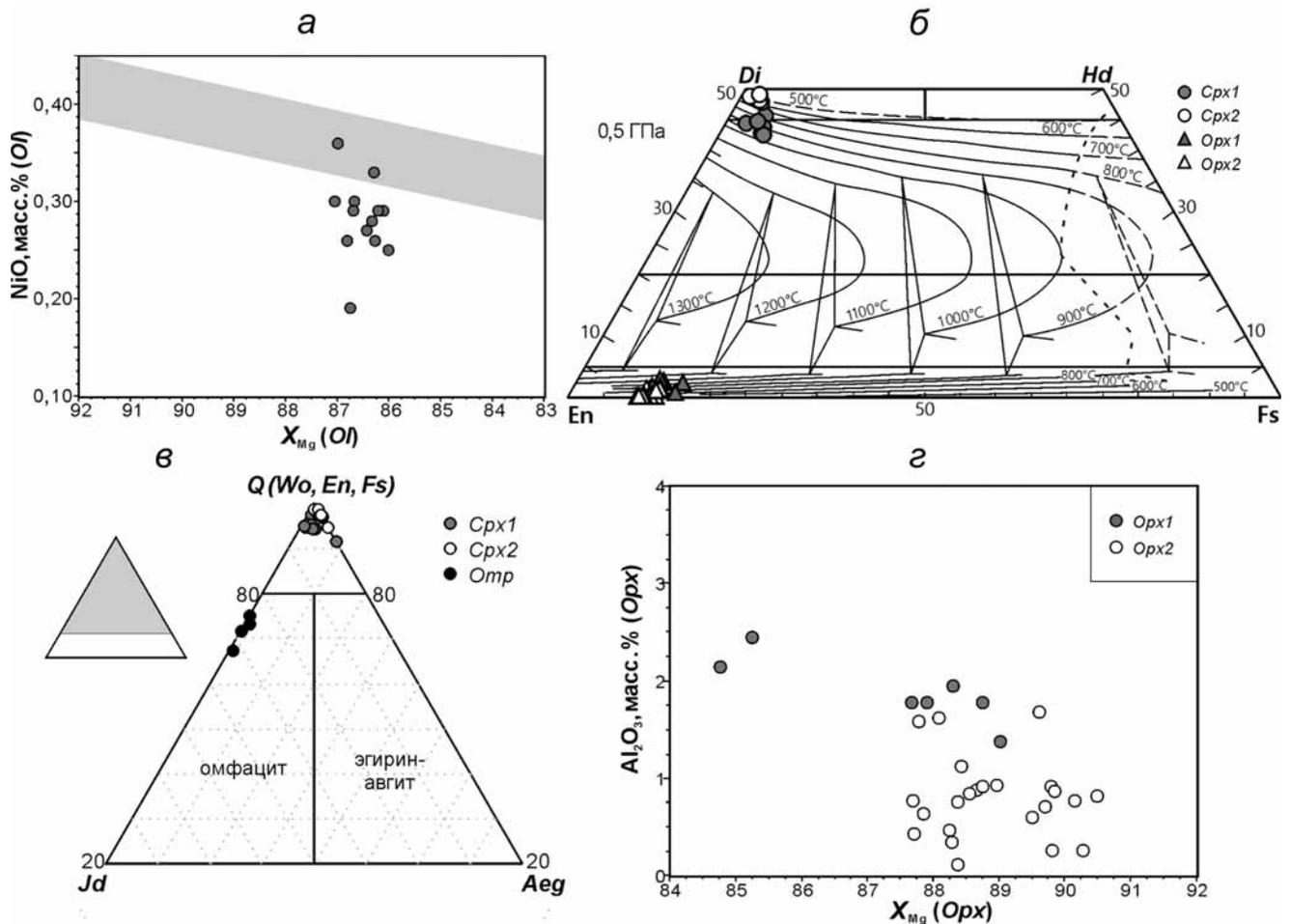


Рис. 4. Мафические минералы и важнейшие параметры их состава: *a* — магматический оливин на прямоугольной диаграмме  $X_{Mg}$ -NiO масс.%. Темное поле — составы мантийных оливинов, по [Takahashi, 1987]; *б* — клино- и ортопироксены разных генераций на политермальной диаграмме для давления 0,5 ГПа, по [Lindsley, 1983]; *в* — клинопироксены разных генераций на классификационной диаграмме [Morimoto, 1988]; *г* — ортопироксены разных генераций на диаграмме  $X_{Mg}$ - $Al_2O_3$ , масс.%

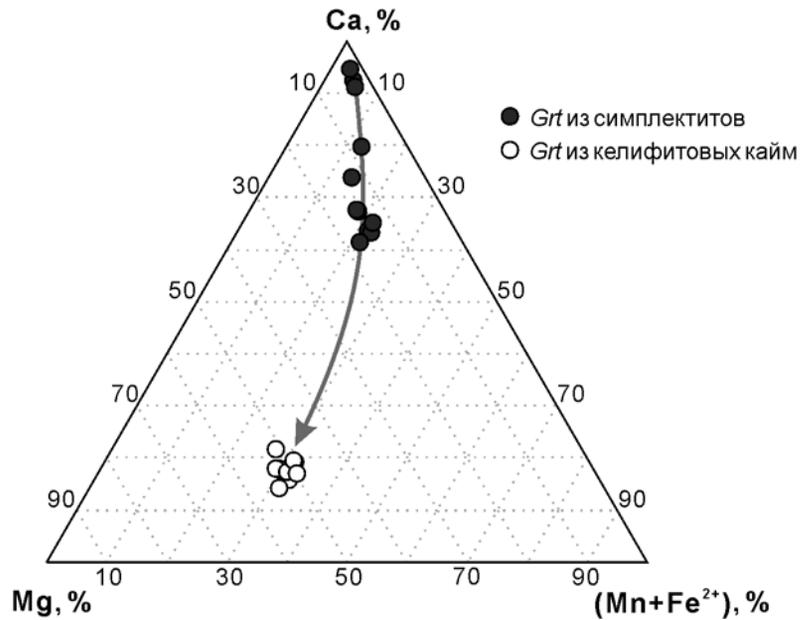
Моделирование фазовых равновесий (метод псевдосекций) осуществлялось с помощью программного комплекса *Perple\_X*, ver. 6.8.3 [Connolly, 2005]. При моделировании использовалась термодинамическая база данных *hpl1ver.dat* [Holland, Powell, 2011], а также модели твердых растворов для граната (обозначение в программе — Gt(HP); [Holland, Powell, 1998]) и ортопироксена (Opx(HP); [Holland, Powell, 1996]).

В силу неоднородности проявления аллохимического метаморфизма в породе, создающего в ней явно неравновесные участки, валовой состав всей породы не эффективен для моделирования фазовых равновесий. Поэтому в моделировании использовался только эффективный химический состав равновесного участка с новообразованными гранатом и ортопироксеном (рис. 6, *a*). Количество трехвалентного железа в расчетах не учитывалось. Моделирование фазовых равновесий показало, что гранат и ортопироксен сосуществуют в широком диапазоне  $P$ - $T$  условий (рис. 6, *a*) и их составы, представленные на диаграмме в виде изоплет  $Al_2O_3$  (масс.%),  $X_{Mg}$  в ортопироксене и  $X_{Mg}$  в гранате

отвечают природным при температуре  $\sim 650$  °C и давлении  $\sim 2,3$  ГПа (рис. 6, *a*). Модельные объёмные содержания граната и ортопироксена при этих  $P$ - $T$  параметрах составляют 50,53% и 49,24%, соответственно, что хорошо воспроизводит заданные объёмы в 50%. Моделирование показывает, что в парагенезисе может присутствовать пренебрежимо малое количество шпинели (0,23 об.%).

Независимое восстановление  $P$ - $T$  параметров проводилось с помощью классической минеральной термобарометрии. Для этого параметры состава краевых частей для трех пар контактирующих граната и ортопироксена (*Opx2*) (табл. 2 и 3) подставляли в уравнения минералогических геотермометров и геобарометров [Harley, 1984; Nickel, Green, 1985; Brey, Köhler, 1990; Carswell, Harley, 1990; Taylor, 1998], представленных в программе *PTQuick*, версия 1.3 [Доливо-Добровольский Д.В., URL: <http://www.dimadd.ru/en/Programs/ptquick>]. Пересечение линии гранат-ортопироксеновых геобарометров [Nickel, Green, 1985; Brey, Köhler, 1990; Taylor, 1998] и геотермометров [Harley, 1984; Brey, Köhler, 1990; Carswell, Harley, 1990] дают значения

Рис. 5. Состав граната из разных участков метаморфических преобразований на треугольной диаграмме Ca-Mg-(Fe+Mn). Стрелка — изменения состава в направлении к мафическим минералам



давления, равные  $P=2,2\pm 0,4$  ГПа, и температуры —  $T=680\pm 60$  °С (рис. 6, б). Отметим, что близкий наклон линий может приводить к значительным вариациям давления при небольшом изменении температуры.

Таким образом, оба метода показывают довольно близкие условия метаморфизма, проявленного в меланократовом оливиновом габбро.

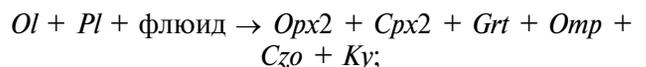
**Результаты исследований и их обсуждение.**

Включения в минералах эклогитов нередко представлены реликтовыми минералами ранних парагенезисов, играющими важную роль в реконструкции метаморфической эволюции пород [напр., Перчук и др., 1998; Faryad et al., 2013]. Округлые включения, сложенные симплектитами метаморфических минералов, находящиеся в более ранних магматических минералах (рис. 2, в, з), в действительности включениями не являются, и потому их следует называть псевдовключениями, так как их морфология и нахождение в оливине (или пироксенах) обусловлены амёбообразными формами исходного плагиоклаза (рис. 2, а), по которому на эклогитовой стадии метаморфизма развивается симплектитовый агрегат. Некоторые сечения шлифа через цилиндрические выросты плагиоклазовых доменов способны создать в плоскости шлифа ложный эффект включения. Разные углы и глубины сечений приводят к включениям различного парагенезиса. Например, на рис. 3 показано гипотетическое сечение, проходящее через оливин, магматический клинопироксен и плагиоклазовый домен, при котором получается округлое включение с парагенезисом  $Grt+Omp+Ky\pm Czo$  в магматическом клинопироксене ( $Cpx1$ ) (рис. 2, в, соответственно, с сечением «I» на рис. 2, б). А другое сечение через оливин и краевую часть плагиоклазового домена создаст псевдовключение с парагенезисом

$Grt+Ky?$  (рис. 2, з, соответственно с сечением «II» на рис. 2, б).

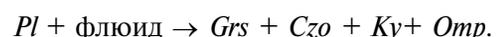
Коронарные структуры, развивающиеся при эклогитовом метаморфизме на границах магматических мафических минералов и плагиоклаза, хорошо известны [Griffin, 1973; Zhang, Liou 1997; Engwik et al., 2001; Davydova et al., 2009; Perchuk, Morgunova, 2014]. Результаты кинетического моделирования образования этих структур в породах комплекса Марун-Кей представлены в работе [Larikova, Zarausky, 2009].

Коронарные структуры на границах оливина и клинопироксена с плагиоклазом отличаются, и потому могут быть представлены разными обобщенными минеральными реакциями с участием водного флюида:



Развитие этих структур контролируется большими градиентами концентраций компонентов и как следствие диффузией Fe и Mg в сторону плагиоклазового домена, а Ca, Na и Al в сторону (Fe, Mg)-минералов. Отметим, что различные элементы имеют разные скорости диффузии, что влияет на образование зональности в келифитовой кайме.

Катионы железа и магния почти не проникают в центральные части плагиоклазовых доменов. Поэтому здесь можно наблюдать локальное замещение плагиоклаза симплектитовым агрегатом (рис. 3, в) по реакции:



Плагиоклазовый домен может являться частично метастабильным [Spry, 2013], поэтому его использование для моделирования фазовых равновесий может применяться с осторожностью.

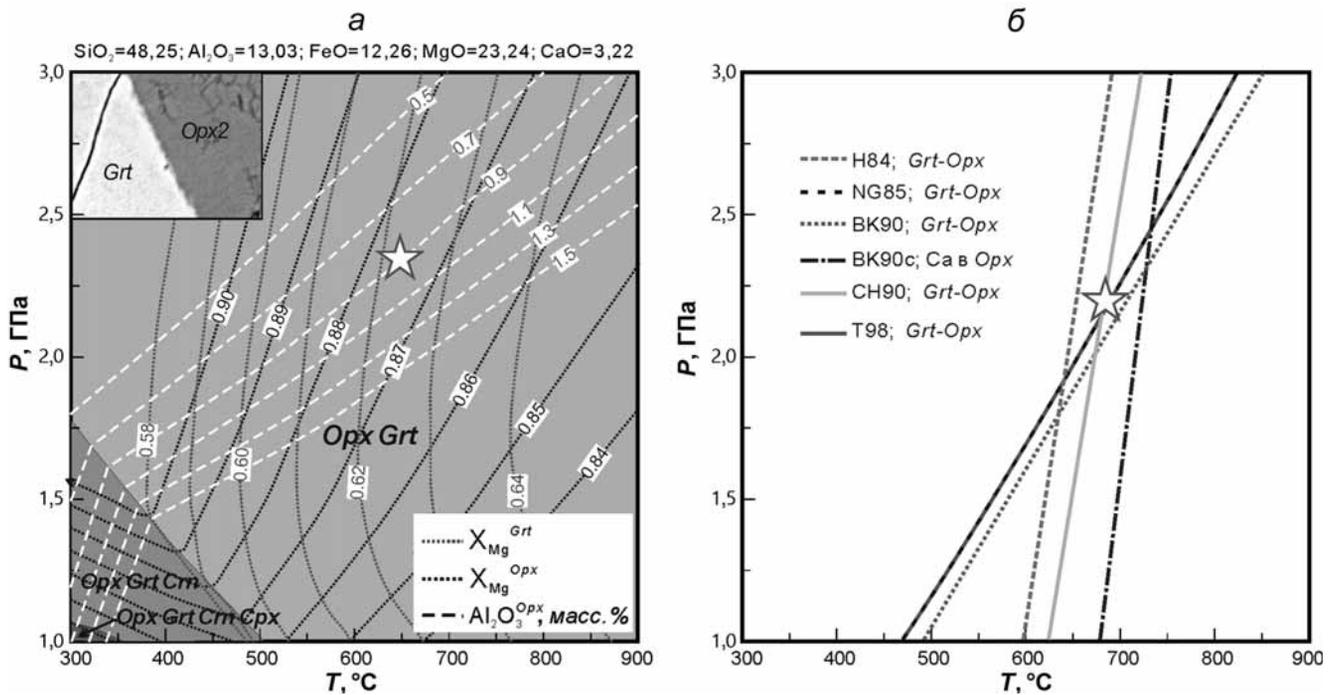


Рис. 6.  $P$ - $T$ -диаграммы с результатами восстановления условий эклогитового метаморфизма:  $a$  — результаты моделирования фазовых равновесий с помощью программного комплекса *Perple\_X*, ver. 6.8.3 [Connolly, 2005], моделирование для приконтактной области сосуществующих граната и ортопироксена. Химический состав приводится над диаграммой в масс.%, изоплеты:  $X_{Mg}^{Grt}$  — серая точечная линия,  $X_{Mg}^{Opx}$  — черная точечная линия,  $Al_2O_3^{Opx}$  масс.% — белый пунктир;  $b$  — линии, рассчитанные по минералогическим геотермометрам (H84 — Harley, 1984), BK90c — Ca в *Opx*, [Brey, Köhler, 1990], CH90 — [Carswell, Harley, 1990] и геобарометрам [NG85 — [Nickel, Green, 1985], BK90 — [Brey, Köhler, 1990], T98 — [Taylor, 1998]) для составов граната и ортопироксена, использованных при моделировании фазовых равновесий на рис. 6,  $a$ . Звездочки на рис. 6,  $a$ ,  $b$  —  $P$ - $T$  условия пика метаморфизма. Пояснения см. в тексте

Отметим, что магматические меланократовые минералы (*Ol*, *Opx*, *Spx*) сохраняются при метаморфизме много лучше, чем плагиоклаз. Предпочтительное замещение плагиоклаза при эклогитовом метаморфизме неоднократно описывалось и в других высокобарных комплексах в связи с миграцией флюида сквозь кристаллы плагиоклаза [например, Perchuk, Morgunova, 2014].

**Выводы.** 1. В меланократовом оливиновом габбро из района Слюдяной Горки комплекса Марун-Кеу, как и ранее в гранат-амфиболовом лерцолите, установлены реликты кумулусной структуры.

2. Округлые включения метаморфических минералов в оливине являются псевдовключениями, т.к. отражают особенности сечения шлифа при наличии амёбовидной формы плагиоклазовых доменов в породе.

3. Меланократовое оливиновое габбро подверглось эклогитовому метаморфизму при давлении

$P=2,2\pm 0,4$  ГПа и температуре  $T=680\pm 60$  °С в ходе континентальной субдукции под островную дугу. Полученные результаты хорошо согласуются с установленными нами ранее условиями образования эклогитов ( $P\sim 1,89\div 2,13$  ГПа,  $T\sim 685\text{--}745$  °С) [Liu et al. 2018] и гранат-амфиболового лерцолита ( $P\sim 2,1$  ГПа,  $T\sim 640\text{--}740$  °С) [Лю и др., 2019] из района Слюдяной Горки комплекса Марун-Кеу. Это можно рассматривать как косвенное подтверждение предложенной нами модели о единой термо-тектонической эволюции разных типов пород из южной части комплекса [Liu et al., 2018].

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Е.В. Гусевой за помощь в аналитических исследованиях, А.А. Арискину за консультации по кумулусным структурам. В исследованиях использовалось оборудование, приобретенное по Программе развития Московского университета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Куликова К.В. Редкоземельные элементы в породах и минералах из эклогитов района Слюдяной Горки (хребет Марункеу, Полярный Урал) // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана. Сыктывкар, 2005. С. 115–124.

Лю И., Перчук А.Л., Арискин А.А. Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал // Петрология. 2019. № 2. С. 136–157.

Перчук А.Л., Япаскурт В.О., Подлесский С.К. Условия формирования и динамика подъема эклогитов Кокчетавского массива (район горы Сулу-Тюбе) // Геохимия. 1998. № 9. С. 979–988.

Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. Первые данные о проявлении УНР-метаморфизма на Полярном Урале // Докл. РАН. 2017. Т. 476, № 6. С. 681–684.

Удовкина Н.Г. Эклогиты Полярного Урала. М.: Наука, 1971. 191 с.

- Удовкина Н.Г.* Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 286 с.
- Уляшева Н.С., Ронкин Ю.Л.* Химический состав и геодинамические обстановки формирования протолитов амфиболитов и гранатовых эклогитов марункеуского комплекса (Полярный Урал) // Изв. Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2014. Т. 1. С. 71–79.
- Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоуц Э., Козьменко О.А. и Куренков С.А.* Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // Докл. РАН. 2000. Т. 371, № 4. С. 519–523.
- Brey G.P., Köhler T.* Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // Journal of Petrology. 1990. Vol. 31, N 6. P. 1353–1378.
- Carswell D.A., Harley S.L.* Mineral barometry and thermometry // In: Carswell D.A. (Ed.), Eclogite Facies Rocks, Blackie & Sons, Glasgow. 1990. P. 83–110.
- Connolly J.A.* Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction Czone decarbonation // Earth and Planetary Science Letters. 2005. Vol. 236, N 1–2. P. 524–541.
- Davydova V.V., Perchuk A.L., Stoeckhert B.* Petrology of coronite from the Bergen Arcs Complex, Norway // Moscow University Geology Bulletin. 2009. Vol 64, N 3. P. 166–176.
- Faryad S.W., Jedlicka R. & Collett S.* Eclogite facies rocks of the Monotonous unit, clue to Variscan suture in the Moldanubian Zone (Bohemian Massif) // Lithos. 2013. 179. P. 353–363.
- Glodny J., Austrheim H., Molina J.F. et al.* Rb/Sr record of fluid-rock interaction in eclogites: The Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. Vol. 67, N 22. P. 4353–4371.
- Glodny J., Pease V., Montero P. et al.* Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre-and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin // Geological Society, London, Memoirs. 2004. Vol. 30, N 1. P. 87–105.
- Griffin W.L., Heier K.S.* Petrological implications of some corona structures // Lithos. 1973. Vol.86, N 4. P. 315–335.
- Harley S.L.* An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. Vol.86, N 4. P. 359–373.
- Holland T., Powell R.* Thermodynamics of order-disorder in minerals: II. Symmetric formalism applied to solid solutions // Amer. Mineral. 1996. Vol. 81, N 11–12. P. 1425–1437.
- Holland T.J.B., Powell R.* An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // J. Metamorph. Geol. 1998. Vol. 16, N 3. P. 309–343.
- Holland T.J.B., Powell R.* An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids // J. Metamorph. Geol. 2011. Vol. 29, N 3. P. 333–383.
- Larikova T.L., Zاراиски G.P.* Experimental modelling of corona textures // J. Metamorph. Geol. 2009. Vol. 27, N 2. P. 139–151.
- Lindsley D.H.* Pyroxene thermometry // Amer. mineral. 1983. Vol 68, N 5–6. P. 477–493.
- Liu Y.Y., Perchuk A.L., Philippot P.* Eclogites from the Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: a record of hot subduction and sub-isothermal exhumation // Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2018. Vol. 474. P. SP474–6. DOI: 10.1144/SP474.6
- Molina J.F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A.* The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism // Lithos. 2002. Vol. 61, N 1. P. 55–78.
- Morimoto N.* Nomenclature of pyroxenes // Mineral. and Petrol. 1988. Vol 39, N 1. P. 55–76.
- Nickel K.G., Green D.H.* Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds // Earth and Planet. Sci. Lett. 1985. Vol. 73, N 1. P. 158–170.
- Perchuk A.L., Morgunova A.A.* Variable P–T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: Petrological evidence and geodynamic implications // Gondwana Research. 2014. Vol. 25, N 2. P. 614–629.
- Spry A.* Metamorphic Textures. Elsevier Science. 2013. 358 p.
- Takahashi E.* Primary magma compositions and Mg/Fe ratios of their mantle residues along Mid Atlantic Ridge 29° N to 73° N // Technical Report of ISEI Okayama University. 1987. Series A 9. P. 1–14.
- Taylor W.R.* An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolite and garnet websterite // Neues Jahrb. f r Mineralogie-Abhandlungen. 1998. P. 381–408.
- Wager L.R., Brown G.M., Wadsworth W.J.* Types of igneous cumulates // Petrology. 1960. Vol. 1, N 1. P. 73–85.
- Whitney D.L., Evans B.W.* Abbreviations for names of rock-forming minerals // Amer. mineral. 2010. Vol 95, N 1. P. 185–187.
- Zhang R.Y., Liou J.G.* Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrain, Eastern China // J. Metamorph. Geol. 1997. Vol 15, N 2. P. 183–202.

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации

**ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ  
«ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. Серия 4. ГЕОЛОГИЯ»**

Для публикации в журнале принимаются статьи сотрудников, аспирантов и студентов МГУ (в том числе в соавторстве с представителями других организаций). Текст сопровождается выпиской из протокола заседания кафедры, актом экспертизы, сведениями обо всех авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), кафедра, должность, ученое звание, ученая степень, телефон домашний и рабочий, мобильный, *e-mail* (обязательно). Статьи принимают на геологическом факультете МГУ, комн. 515а.

**Требования к оформлению статьи  
и краткого сообщения**

1. Суммарный объем статьи (включая рисунки и список литературы) не должен превышать 24 страницы, объем краткого сообщения суммарно составляет 6 страниц. Рекомендуется стандартизировать структуру статьи, используя подзаголовки, например: **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение (выводы)** и пр.

2. К статье на отдельной странице прилагаются аннотация (6–8 строк) и ключевые слова (6–8) на русском языке, а также аннотация и ключевые слова на английском языке. На отдельной странице необходимо приложить перевод фамилий, инициалов авторов и названия статьи на английский язык.

3. Перед заголовком работы необходимо проставить УДК.

4. Текст должен быть подготовлен в редакторе Word с использованием шрифта Times New Roman 12. Имя файла может содержать до 8 символов и иметь расширения .doc или .txt. Текст должен быть распечатан через 2 интервала, поля со всех сторон по 2,5 см. Текст представляют на отдельном носителе (компакт-диске) и в 2 экз. распечатки. Страницы следует пронумеровать.

5. Рисунки, фотографии, таблицы, подписанные подписи прилагаются отдельно в 2 экз. в конце статьи. Каждая таблица должна быть напечатана на отдельной странице тем же шрифтом, через 2 интервала, иметь тематический заголовок и не дублировать текст. Таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки и быть разделены вертикальными линиями. Сокращения слов в таблицах не допускаются. Материал по строкам должен быть разделен горизонтальными линиями.

6. Формулы, математические и химические знаки должны иметь четкое написание.

7. Размерность всех физических величин должна соответствовать Международной системе единиц (СИ).

8. Список литературы должен содержать в алфавитном порядке все цитируемые и упоминаемые в тексте работы, иностранная литература помещается после отечественной тоже по алфавиту. При ссылке на изобретение необходимо указать год, номер и страницу «Бюллетеня изобретений». Ссылки на неопубликованные работы не допускаются (возможны ссылки на устное сообщение и автореферат кандидатской или докторской диссертации). Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилии и инициалы авторов, название статьи, полное название работы, место издания, издательство, год издания (для неперiodических изданий), для периодических — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год выпуска, том, номер, страницы. Ссылка на литературный источник в тексте приводится так: «В работе [Иванов и др., 1999] указано, что...».

9. Никакие сокращения слов, имен, названий, как правило, не допускаются. Разрешаются лишь общепринятые сокращения названий мер, физических, химических и математических величин и терминов и т.д. Все аббревиатуры, относящиеся к понятиям, методам аналитическим и обработки данных, а также к приборам, при первом употреблении в тексте должны быть расшифрованы.

10. Каждый рисунок должен быть выполнен на белой бумаге в виде компьютерной распечатки на лазерном принтере. Для растровых (тоновых) рисунков использовать формат TIFF с разрешением 600 dpi; векторные рисунки необходимо предоставлять в формате программы, в которой они сделаны; для фотографий использовать формат TIFF с разрешением не менее 300 dpi. Рисунки и фотографии должны быть черно-белыми, четко выполнены и представлены в 2 экз. Компьютерный вариант должен иметь расширения .tiff или .cdr (Corel Draw) и предоставляться на отдельном носителе (компакт-диске), рисунок следует записывать в той программе, в которой они сделаны. На обороте всех иллюстраций указывают их номер, фамилию автора и название статьи. **Обращаем ваше внимание на то, что текст и рисунки предоставляются на отдельных дисках.**

11. Подписанные подписи прилагаются на отдельной странице и оформляются согласно требованиям, изложенным в п. 4.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, не принимаются.

13. Дополнения в корректуру не вносятся.

14. Редакция журнала оставляет за собой право производить сокращение и редакционные изменения текста статей.

**Плата за публикацию не взимается.**

*Благодарим вас за соблюдение наших правил  
и рекомендаций!*

<http://www.geol.msu.ru/vestnik/index.htm>

## УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;  
геологический факультет МГУ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Д.Ю. ПУЩАРОВСКИЙ** — **главный редактор**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН

**Е.А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ** — **зам. главного редактора**, доктор геолого-минералогических наук, профессор

**Р.Р. ГАБДУЛЛИН** — **ответственный секретарь**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

**И.М. АРТЕМЬЕВА** — профессор Университета Копенгагена, Дания

**И.С. БАРСКОВ** — доктор биологических наук, профессор

**А.Б. БЕЛОНОЖКО** — профессор Университета Стокгольма, Швеция

**С.В. БОГДАНОВА** — профессор Университета Лунд, Швеция

**М.В. БОРИСОВ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**А.В. БРУШКОВ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**А.А. БУЛЫЧЕВ** — доктор физико-математических наук, профессор

**М.Л. ВЛАДОВ** — доктор физико-математических наук, профессор

**Т.В. ГЕРЯ** — профессор Швейцарского Федерального технологического университета (ETH Zurich)

**М.С. ЖДАНОВ** — профессор Университета Солт-Лейк-Сити, США

**Н.В. КОРОНОВСКИЙ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**Д.Г. КОШУГ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**А.С. МАРФУНИН** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**А.М. НИКИШИН** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**А.Р. ОГАНОВ** — профессор Университета Стони-Брук, США

**А.Л. ПЕРЧУК** — доктор геолого-минералогических наук

**С.П. ПОЗДНЯКОВ** — доктор геолого-минералогических наук

**В.И. СТАРОСТИН** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**А.В. СТУПАКОВА** — доктор геолого-минералогических наук, доцент

**В.Т. ТРОФИМОВ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**В.К. ХМЕЛЕВСКОЙ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

**В.В. ШЕЛЕПОВ** — доктор геолого-минералогических наук, профессор

Редактор **А.Е. ЛЮСТИХ**

## Адрес редакции:

*e-mail:* vtmu\_red@mail.ru

*Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.*

*Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.*

Подписано в печать 16.04.2019. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 13,0. Тираж экз.

Изд. № 11 197. Заказ

---

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

(ул. Академика Хохлова, 11)

Тел.: (495) 939-32-91; e-mail: secretary@msupublishing.ru

**ISSN 0201-7385**  
**ISSN 0579-9406**

**ИНДЕКС 70995 (каталог “Роспечать”)**  
**ИНДЕКС 34114 (каталог “Пресса России”)**

---