

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ LANDSAT И РЕСУРС-П ДЛЯ ПРОГНОЗА АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ В АРХАНГЕЛЬСКОЙ И ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТЯХ РОССИИ

© 2025 г. Г. А. Миловский<sup>1</sup>, \*, А. Д. Апарин<sup>1</sup>, Н. О. Есманская<sup>1</sup>, Ю. А. Иванова<sup>1</sup>,  
А. И. Никитин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный геоинформационный центр РАН, Москва, Россия

\*E-mail: oregas@mail.ru

Поступила в редакцию 23.12.2024 г.

Выполнено комплексное исследование материалов космической и геолого-геофизической съемки для прогноза алмазоносных кимберлитов в пределах Архангельской и Вологодской областей России. Разработаны новые методы компьютерной обработки материалов многозональной космической съемки для выявления алмазоперспективных участков на площадях, перекрытых чехлом четвертичных и среднекаменноугольных отложений. Показана важная роль космической съемки высокого разрешения Ресурс-П для изучения локальных структур, контролирующих размещение кимберлитовых трубок.

*Ключевые слова:* многозональная космическая съемка, геолого-геофизические данные, поисковые признаки, кимберлиты, алмазы

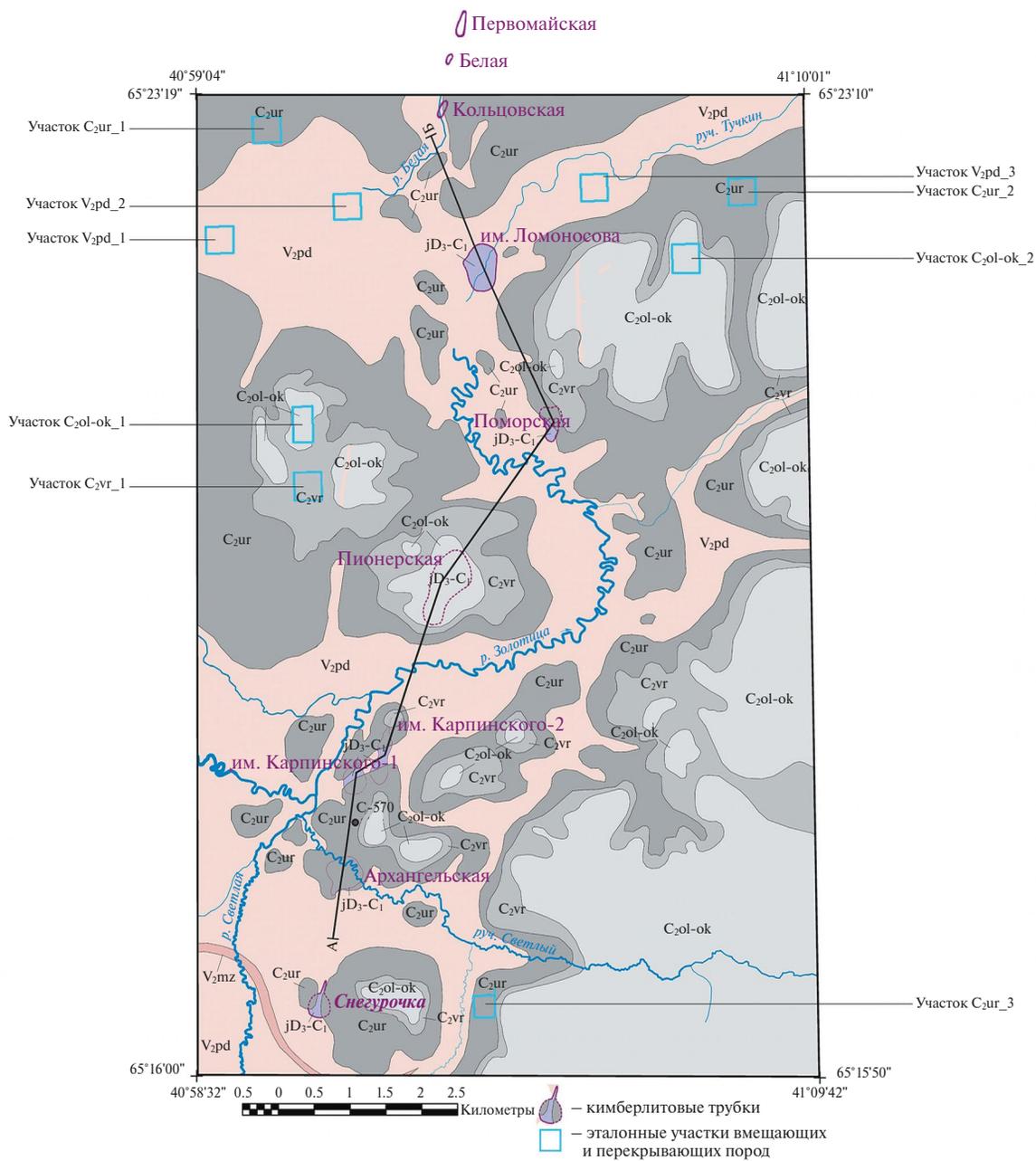
DOI: 10.7868/S3034540525030055

### ВВЕДЕНИЕ

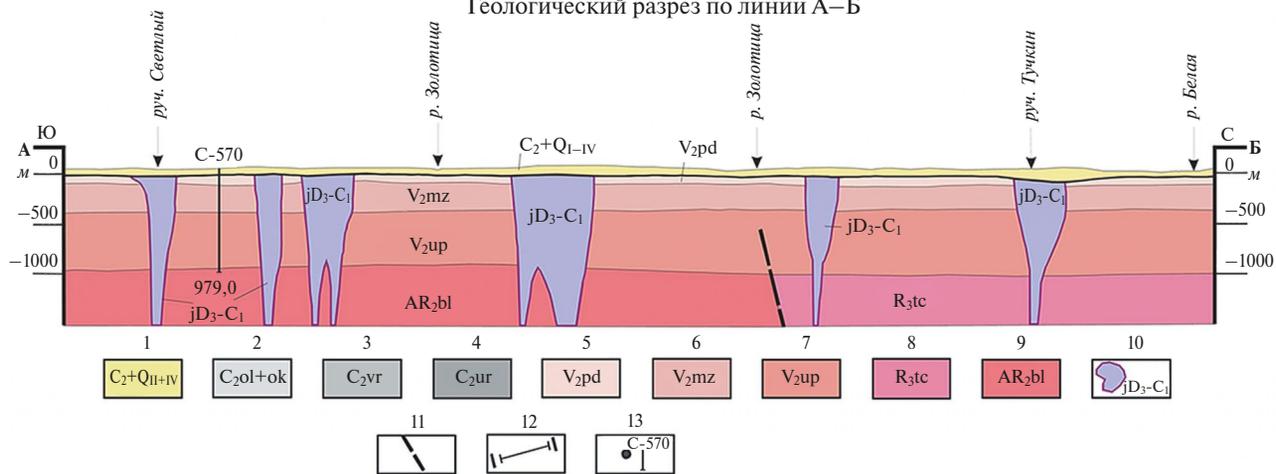
В центральной части эталонной площади расположено месторождение им. Ломоносова (трубки им. Ломоносова, Поморская, Пионерская, им. Карпинского-1,2, Архангельская); трубки Снегурочка, Кольцовская, Белая, Первомайская (рис. 1). Кимберлитовые трубки (возраст D3-C1) месторождения им. Ломоносова делятся на две основные морфологические группы. К первой группе относятся тела с округлыми или овальными очертаниями (им. Ломоносова, им. Карпинского-1, Архангельская), во вторую группу входят трубки с неправильными контурами, осложненными пережимами в центральной части (им. Карпинского-2 и Пионерская). Это разделение обусловлено приуроченностью трубок первой группы к подводящим каналам центрального типа, а второй – трещинного типа. С глубиной конфигурация горизонтальных сечений трубок первой группы существенно не меняется, а второй – переходит в четко выраженную линзовидную или дайкообразную форму. Внутреннее строение кимберлитовых трубок сложное, что обусловлено многофазностью их формирования и особенностями внедрения магматического расплава. Кимберлиты, слагающие раструб, жерловую и дайковую части вулканического аппарата, относятся к трем магма-

тическим фациям, соответственно, кратерной, жерловой и подводящего канала.

В региональном структурном плане эталонный район приурочен к узлу пересечения пояса высокой проницаемости северо-западного простирания с поперечной структурой повышенной проницаемости северо-восточной ориентировки; разломы фундамента Зимнебережного района относятся к долгоживущим структурам: они возникли в начале протерозоя и неоднократно подновлялись в более поздние периоды (Кутинов, 2004). Структуры, контролирующие позицию Золотицкого рудного поля, представлены рудоконтролирующим субмеридиональным разломом, сетью разрывных нарушений северо-восточного простирания, секущих дизъюнктивы северо-западного направления, дуговыми разломами, которые подчеркивают южную границу приподнятого блока фундамента, содержащего кимберлитовое поле (Миловский, 2020). На тектонической карте довендских образований (Схематическая..., 2003) трубки месторождения им. Ломоносова локализованы в узле пересечения линейных зон палеозойской активизации северо-восточного (Архангельская) и меридионального (Золотицкая) простирания в области значений изогипс подошвы вендско-палеозойского чехла 800–1000 м. Трубки месторождения им. Ло-



Геологический разрез по линии А–Б



**Рис. 1.** Геологическая карта месторождения им. М.В. Ломоносова по материалам ПАО “Севералмаз” (ФГБУ “РОСГЕОЛФОНД”).

1–4 – Перекрывающие породы. 1 – Объединенный комплекс перекрывающих пород четвертичного и среднекаменноугольного возраста; 2–4 – среднекаменноугольные породы московского яруса каширского горизонта: 2 – олмутской и окуневской свит (известняки, доломитизированные известняки, доломиты), 3 – воереченской свиты (известняки, доломитизированные известняки с прослоями известковистых глин), 4 – урзугской свиты (пески, песчаники с прослоями глин и гравелитов).

5–9 – Вмещающие породы. 5–7 – Валдайской серии венда верхнего протерозоя: 5 – падуновской свиты котлинского горизонта (песчаники с прослоями алевролитов), 6 – мезенской свиты котлинского горизонта (песчаники и алевролиты с прослоями аргиллитов), 7 – усть-пинезжской свиты редкинского горизонта (аргиллиты и алевролиты с прослоями песчаников, гравелиты); 8 – тучкинской свиты сафоновской серии верхнего рифея (аргиллиты, алевролиты, мергели, аркозы); 9 – беломорской серии верхнего архея (гнейсы, гранито-гнейсы, граниты и амфиболиты).

10 – Кимберлитовые трубки; 11 – тектонические разломы; 12 – линии геологических разрезов; 13 – структурно-параметрическая скважина.

моносова локализованы в краевой части Кулойского выступа на границе с Керещкой впадиной, в области узкого диапазона слаболожительных значений потенциальных полей.

Выбор районов для постановки прогнозно-поисковых работ определяется известными поисковыми критериями, включающими: наличие в районе работ линейной глубинной зоны высокой проницаемости, скрытых разломов фундамента, чередование разноконтрастных удлиненно-вытянутых зон региональных магнитных и гравитационных аномалий, приуроченность кимберлитоконтролирующих глубинных разломов к плечевой части рифтов и авлакогенов, гравитационные ступени, линейные впадины и поднятия рельефа поверхности Мохоровичича, глубина подошвы литосферы 150–200 км, мощность осадочного чехла не более 2 км и др. (Ваганов, 1995; Ваганов, 2002; Гладков, 2008; Подчасов, 2004; Прусакова, 2021; Серокуров, 2001; Устинов, 2018). Поисковые критерии кимберлитовых трубок на Сибирской и Восточно-Европейской платформах рассмотрены в материалах АК “АЛРОСА” (Горев, 2005; Программа, 2012; Фолисевиц, 2000). Обработке фотоизображений для выявления поисковых признаков трубок взрыва на территории Архангельской области, в том числе и на Золотицком поле, посвящены работы (Антонова, 1992; Лопатин, 2001).

Площади детализации (потенциальные алмазные поля) характеризуются наличием оперяющих разломов главных тектонических нарушений района, пересечением последних поперечными глубинными разломами (возникшими в период тектонической активизации); сменой структуры потенциальных полей – протяженные линейные аномалии сменяются аномалиями изометричной формы; присутствием положительной кольцевой морфоструктуры с радиально-концентрической системой разломов; локальных блоков повышенной трещиноватости с изотропной ориентировкой разрывных нарушений, возникновением положительных магнитных аномалий “трубчатого типа” и др.

Настоящая работа посвящена применению многозональной космической съемки среднего разрешения для распознавания площадей детализации по результатам сравнения эталонных кимберлитовых трубок и “пустых” вмещающих пород с последующим дешифрированием структур алмазоперспективных участков на основе космической съемки высокого разрешения. Для дешифрирования в масштабе 1:150000 ÷ 1:100000 применялись материалы космической съемки Landsat-7 (США). На основе космической съемки Ресурс-П каналы (№№ 10, 21, 22, 23, 33) выполнено космодешифрирование и проведен линеаментный анализ геологических структур в масштабе 1:25000 ÷ 1:10000. Большие массивы исходных данных, полученных при космической съемке высокого и среднего разрешения, и геолого-геофизические данные обрабатывались с помощью программных средств ArcGIS, ENVI, Adobe Photoshop.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПЛОЩАДИ РАБОТ

На основе изложенного выше в Архангельской области был выделен Северодвинский район, в пределах которого определена площадь детализации Урзуга; в Вологодской области выделен район Вытегра с площадью детализации Лема. Площадь детализации Урзуга приурочена к Солзенской ступени в зоне влияния глубинного регионального Урзугского разлома северо-западного простирания. Солзенская ступень образует плечевую часть Онежского грабена, расположенного к юго-западу от Архангельского горста. Региональные линейно-вытянутые зоны гравитационных и магнитных аномалий также ориентированы в северо-западном направлении. Урзугский разлом отчетливо дешифрируется в центральной части района при синтезе изображений в 7-м, 4-м, 2-м – каналах Landsat. На рис. 2 представлена геологическая

карта площади детализации Урзуга. В результате экспертного космодешифрирования на площади детализации Урзуга (рис. 3) выявлены поперечные разломы, смещающие Урзугский региональный разлом, а также ряд кольцевых структур, деформированных дизъюнктивами северо-восточного и субмеридионального простирания. Алмазоперспективный участок Долгозерский отличается повышенной плотностью линейных элементов различной азимутальной направленности, наличием кольцевых структур диаметром 1–2 км. На участке кимберлитовмещающими породами являются вендские терригенные образования мезенской и падуновской свит, которые перекрываются отложениями телзинской и урзугской свит (песчаники, алевролиты, глины с прослоями доломитов и известняков) среднего карбона (Государственная..., 2000). Участок Долгозерский характеризуется структурой линейного типа, расположенной вдоль главной тектонической зоны Урзугского разлома, глубина кристаллического фундамента составляет 1.6 км. На участке выявлены две изометрические аномалии магнитного поля со значениями +1, +2 миллиэрстед; линейные северо-западного простирания гравиметрические аномалии +10 ÷ +12 мГал отвечают Солзенской ступени Онежского грабена. Компьютерное дешифрирование материалов космической съемки Ресурс-П (рис. 4) позволило получить новые данные по строению участка. На участке развиты поперечные разломы северо-восточного простирания, зонально-концентрические и кольцевые структуры различного ранга (рис. 5). В центральной части участка расположены две частично совмещенные (в форме восьмерки) сильно деформированные кольцевые структуры диаметром 2 км каждая. Кольцевые структуры расположены на заболоченной местности, что позволяет по фототону изображения выделять в их пределах локальные кольцевые (диаметром 350–440 м) структуры, отчетливо дешифрируемые по определенным типам болотной растительности. К кимберлитоперспективным можно отнести также кольцевые структуры, расположенные на линии поперечных северо-восточных разломов в центральной части участка. На рис. 5 выделена область, рекомендуемая для постановки наземных геофизических и последующих буровых работ.

В районе Вытегра выделена площадь детализации Лема, которая расположена в межблочной зоне повышенной проницаемости земной коры (рис. 6), характеризуется замкнутой магнитной аномалией овальной формы и наличием гравитационной ступени. При синтезе изображений в 7-м, 4-м, и 2-м каналах Landsat в северо-восточной части района Вытегра отчетливо проявляется линейная зона север-северо-восточного простирания шириной около 4 км, отличающаяся темно-серым фотоном, которая может быть интерпретирована как

область скрытых разломов фундамента, отражающаяся в рисунке потенциальных  $\Delta g$  и  $\Delta T$  полей. К этой зоне приурочена площадь детализации Лема. На рис. 7 представлена геологическая карта площади детализации Лема. В результате экспертного дешифрирования на площади детализации Лема выявлены системы разломов субмеридионального (север-северо-восточного) и северо-восточного простирания, секущие зонально-концентрические кольцевые структуры диаметром 1–2 км. Алмазоперспективный участок Катручейский выделен в области слияния руч. Нижний Катручей и р. Лема. В результате компьютерного дешифрирования получена дополнительная информация, которая позволила уточнить результаты экспертного дешифрирования и выявить новые линейные и дуговые структуры на алмазоперспективном участке Катручейский (рис. 8). Установлено блоковое строение участка, характеризующееся парой параллельных субмеридиональных разломов (с.-с.-в. простирания), внутри которых выявлены фрагменты кольцевых структур и осложняющих их мелких линейных элементов преимущественно северо-западного и субмеридионального простирания. Расположенная в западной части перспективного участка Катручейский, крупная (2 км) зонально-концентрическая структура, частично деформирована субмеридиональным разломом и характеризуется значениями магнитного и гравитационного полей: +2 ÷ +5 миллиэрстед и -6 ÷ -8 миллигал соответственно. Эта структура расположена на локальной возвышенности, приурочена к южному флангу овальной магнитной аномалии и гравитационной ступени, фиксирующей борг Прионежской впадины. В центральной части Катручейского алмазоперспективного участка выделена область для постановки наземных геофизических и последующих буровых работ. Следует отметить, что по геологическим данным мощность перекрывающих отложений над трубками месторождения им. Ломоносова и на участках Долгозерский и Катручейский практически одинаковы (30–60 м). Алмазоперспективный участок Катручейский расположен в краевой части Андомского выступа, на границе с Прионежской впадиной (рис. 9). Таким образом, как эталонные объекты – трубки месторождений им. Ломоносова и им. Гриба, так и алмазоперспективные участки Долгозерский и Катручейский расположены в плечевой части впадин на границе выступов фундамента, т.е. приурочены к структурам одного типа.

Рельеф фундамента контролируют зоны глубинных мантийных разломов, с которыми пространственно-генетически связаны проявления кимберлитового магматизма. Применение томографии гравитационного и магнитного полей позволило выделить структуры, контролирующие кимберлитовый магматизм; показано, что месторождение

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

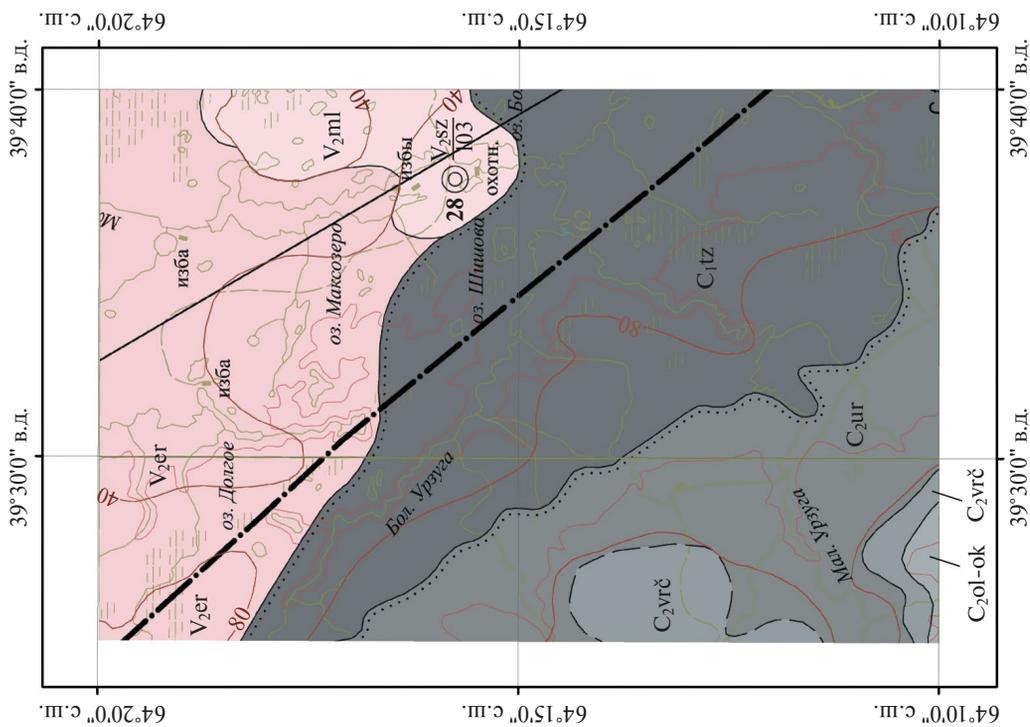
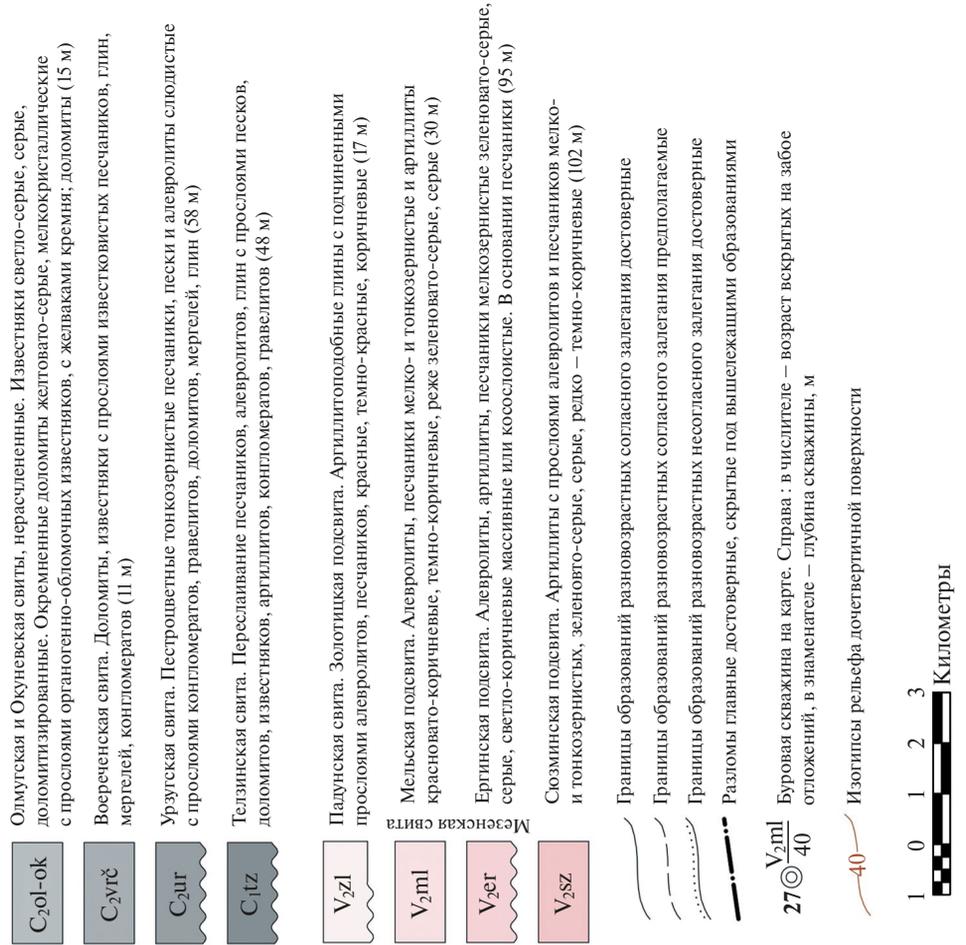


Рис. 2. Геологическая карта масштаба 1 : 200 000. Площадь детализации Урзуга.

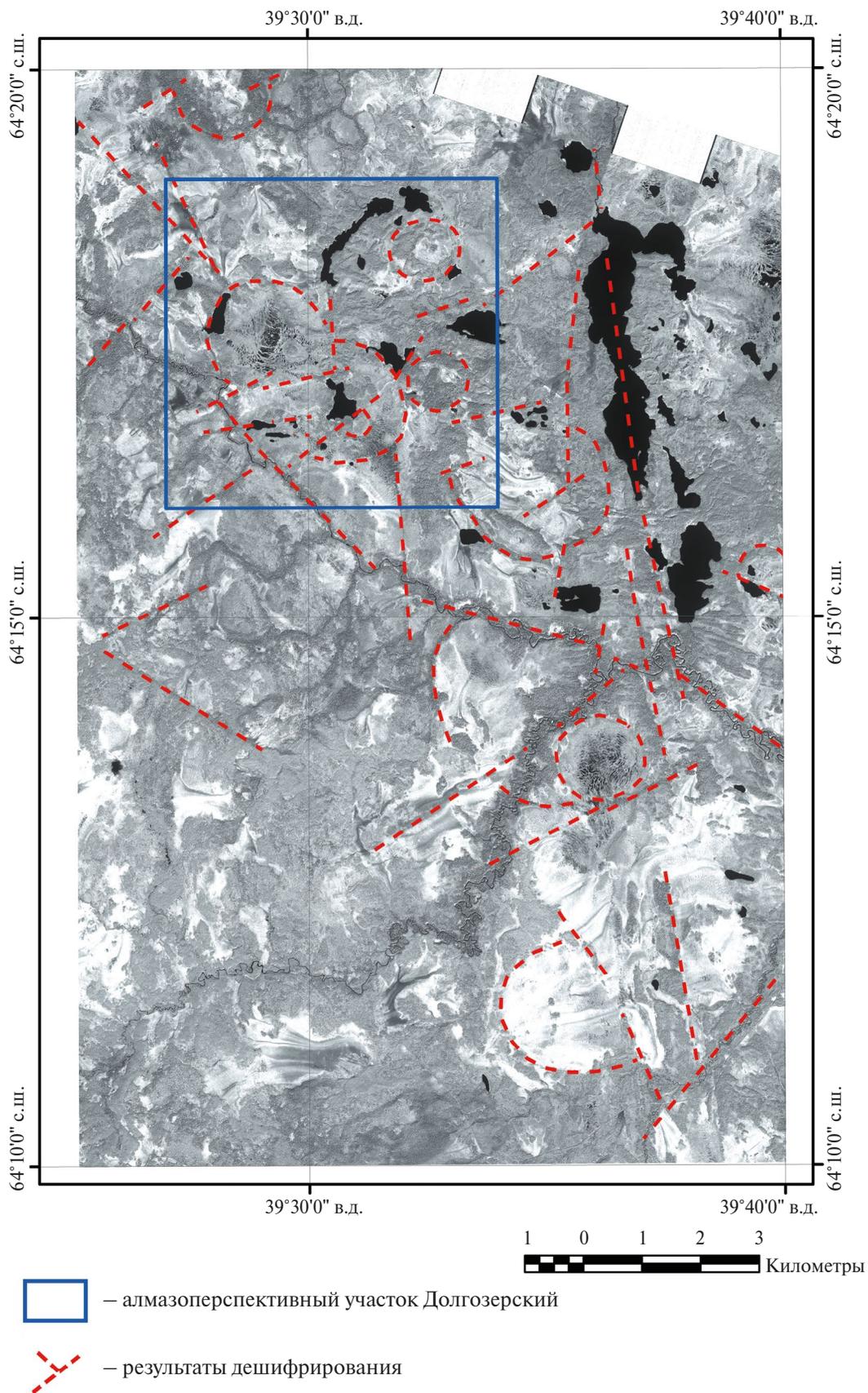


Рис. 3. Результаты космодешифрирования площади детализации Урзуга, КС Ресурс-П:№ 2364\_02.

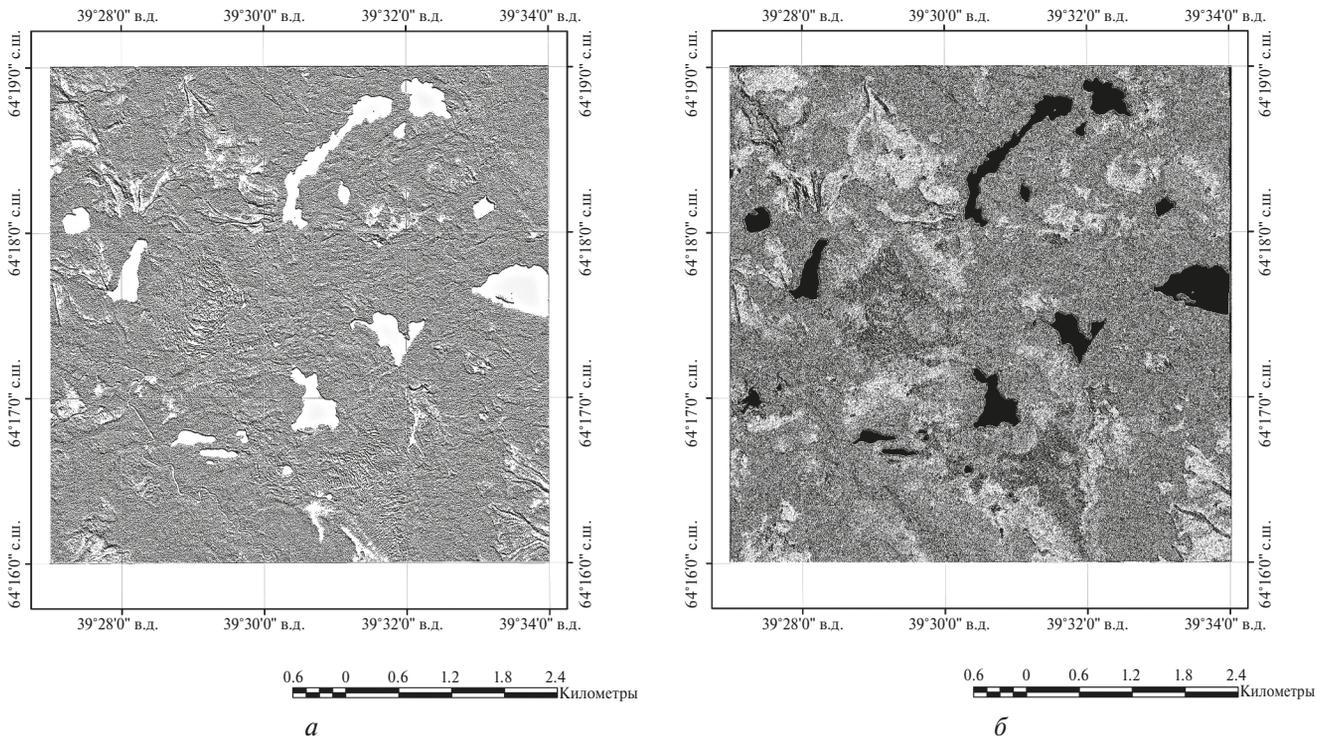


Рис. 4. Алмазоперспективный участок Долгозерский. Варианты компьютерной обработки КС Ресурс-П:№2364\_02.

им. Ломоносова приурочено к региональной воронкообразной структуре, образуемой породами пониженной плотности, контур структуры отличается повышенной намагнитченностью пород (Алексеев, 2018). Размер структуры, в центральной части которой расположено месторождение им. Ломоносова, составляет 400 км, нижняя граница этой воронкообразной структуры находится на глубине около 200 км. Глубина подошвы литосферы в потенциальном алмазонасном районе составляет 150–200 км (Прусакова, 2021). На рис. 10 показано положение эталонных месторождений и перспективных участков на карте подошвы литосферы: месторождения им. Ломоносова и им. Гриба – 140–141 км, алмазоперспективные участки Катручейский и Долгозерский – 136–144 км.

**ПЕРСПЕКТИВЫ КОСМОДЕШИФРИРОВАНИЯ  
В РАЙОНАХ, ПЕРЕКРЫТЫХ  
ТЕРРИГЕННО-КАРБОНАТНЫМИ  
ОТЛОЖЕНИЯМИ ЧЕТВЕРТИЧНОГО  
И СРЕДНЕКАМЕННОУГОЛЬНОГО ВОЗРАСТА**

Внедрение кимберлитов приводит к растрескиванию и брекчированию пород, вокруг каждой диатремы образуется ореол трещиноватости и повышенной проницаемости для гидротерм, формирующих в этом ореоле зону эпимагматических изменений вмещающих пород: формируются эндо-

генные ореолы с аномальными содержаниями Cr, Ni, Co, Ti, Ba, Sr; происходит доломитизация; образуются прожилки сульфидов, кальцита, халцедона; возникают участки интенсивной закарстованности, повышенной битуминозности (Подчасов, 2004). Эти изменения, с учетом циркулирующих поверхностных и грунтовых вод, могут оказать определенное влияние на перекрывающие рыхлые четвертичные образования, так как ореол этих проявлений в 3–5 раз больше диаметра кимберлитовой диатремы и сопоставим с мощностью четвертичных отложений.

Кимберлитовые трубки исследуемого месторождения им. Ломоносова полностью перекрыты чехлом рыхлых четвертичных образований мощностью 13–40 м, в составе которых представлены пески, суглинки, супеси, галечники и торфа. В околотрубочном пространстве вмещающие породы катаклазированы и содержат прожилки карбонатов, кварца и глинистых минералов. Ширина зон изменений может достигать 30 м. В отдельных случаях в экзоконтактовой зоне установлены маломощные жильные инъекции кимберлитов. Исследование метасоматических изменений трубки Архангельская (Шпилевая, 2008) показало, что серпентин  $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ , доминировавший в кимберлите трубки в начальные периоды ее существования, под длительным действием грунтовых вод был редуцирован в сапонит  $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$

вследствие гидратации. Количество минералов группы серпентина (хризотил, лизардит) в трубке до глубины 450 м незначительно (в среднем

5–10 %, до 20 % в отдельных зонах), а содержание минералов группы смектитов (сапонит) в этом интервале глубин составляет 80–95 %.

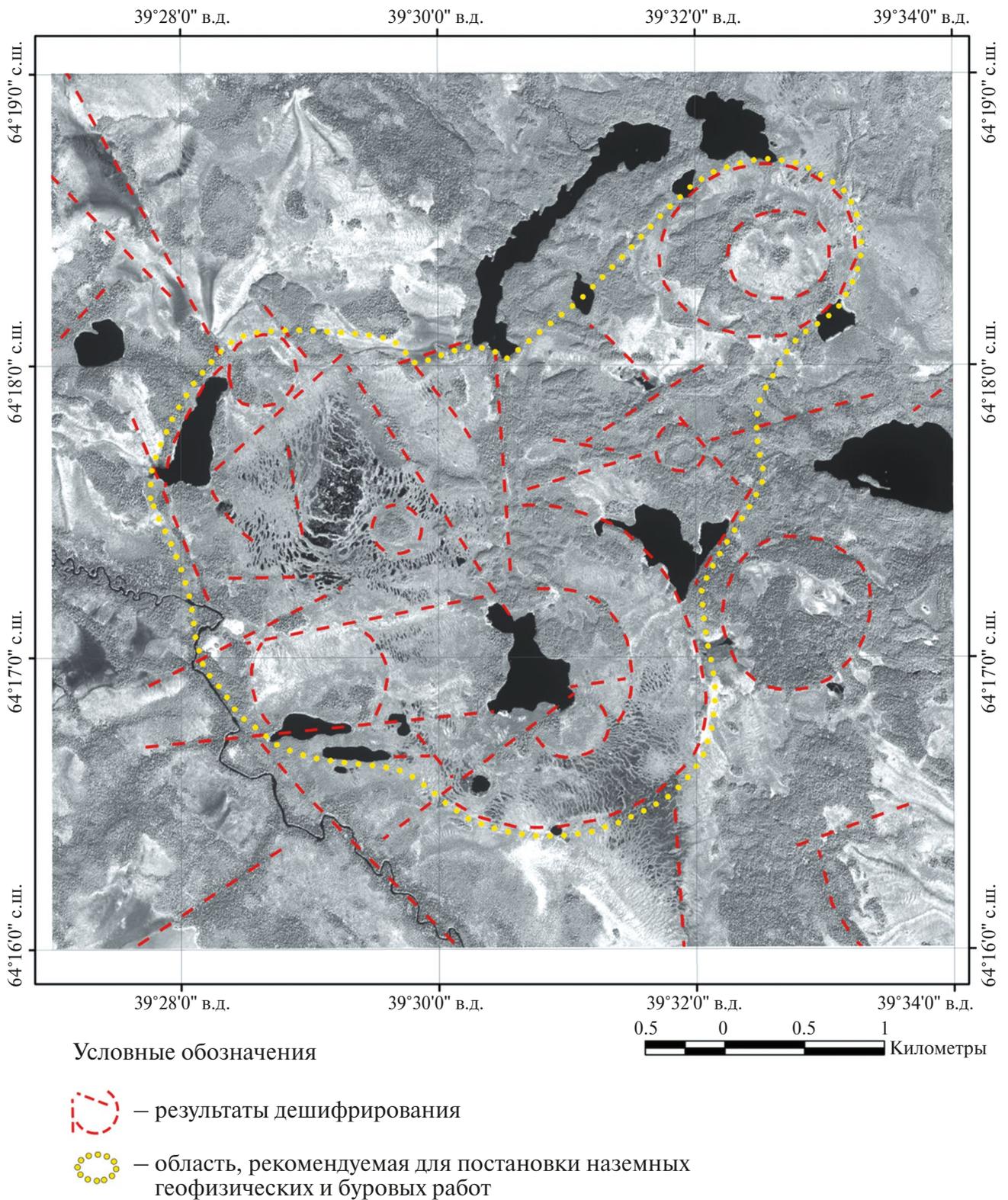
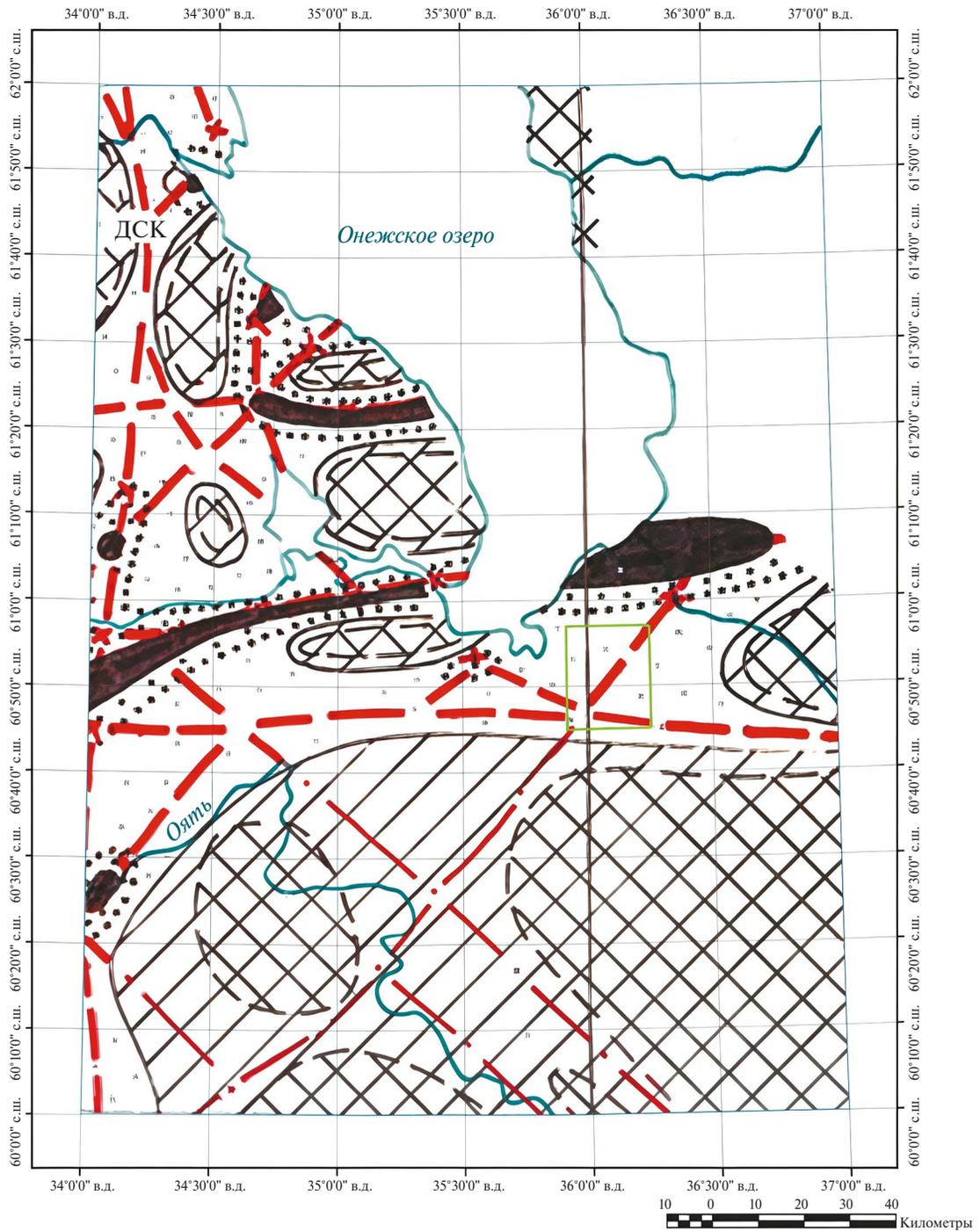


Рис. 5. Результаты дешифрирования алмазоносного участка Долгозерский.



Условные обозначения:

 – Площадь детализации Лема

СТЕПЕНЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

-  Наиболее проницаемые участки
-  Проницаемые участки
-  Слабопроницаемые участки

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОНИЦАЕМОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

-  Малопроницаемые блоки
-  Внутриблочные слабопроницаемые зоны
-  Межблочные проницаемые зоны
-  Межблочные наиболее проницаемые зоны
-  Участки максимальной проницаемости

Рис. 6. Схема проницаемости земной коры по данным гелиевых исследований масштаба 1 : 2 500 000 с площадью детализации Лема.

**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

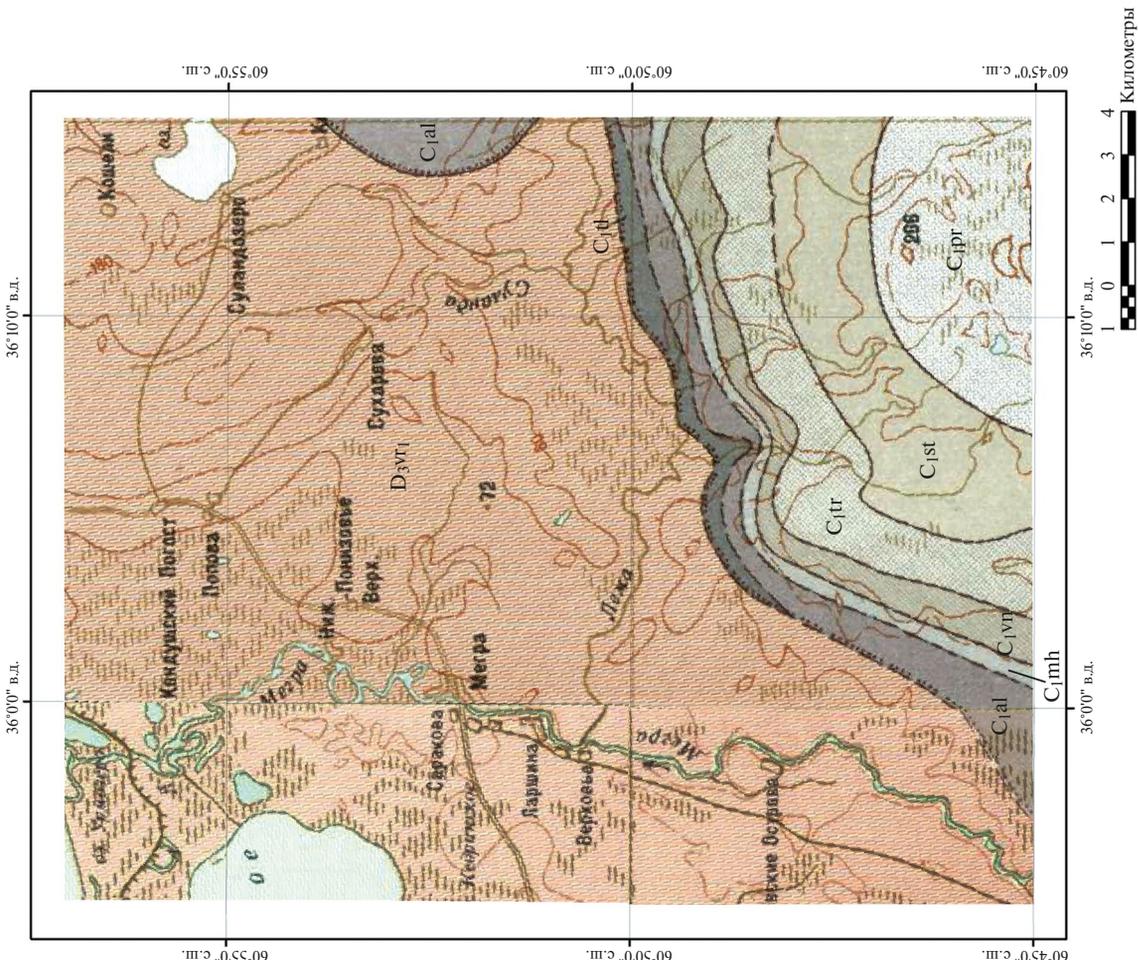
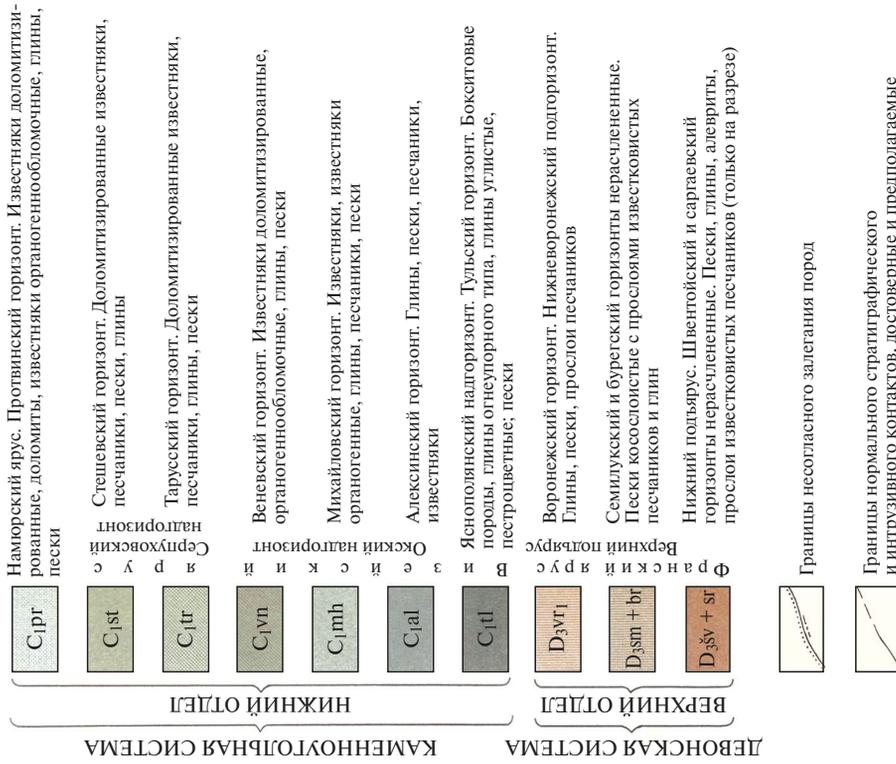
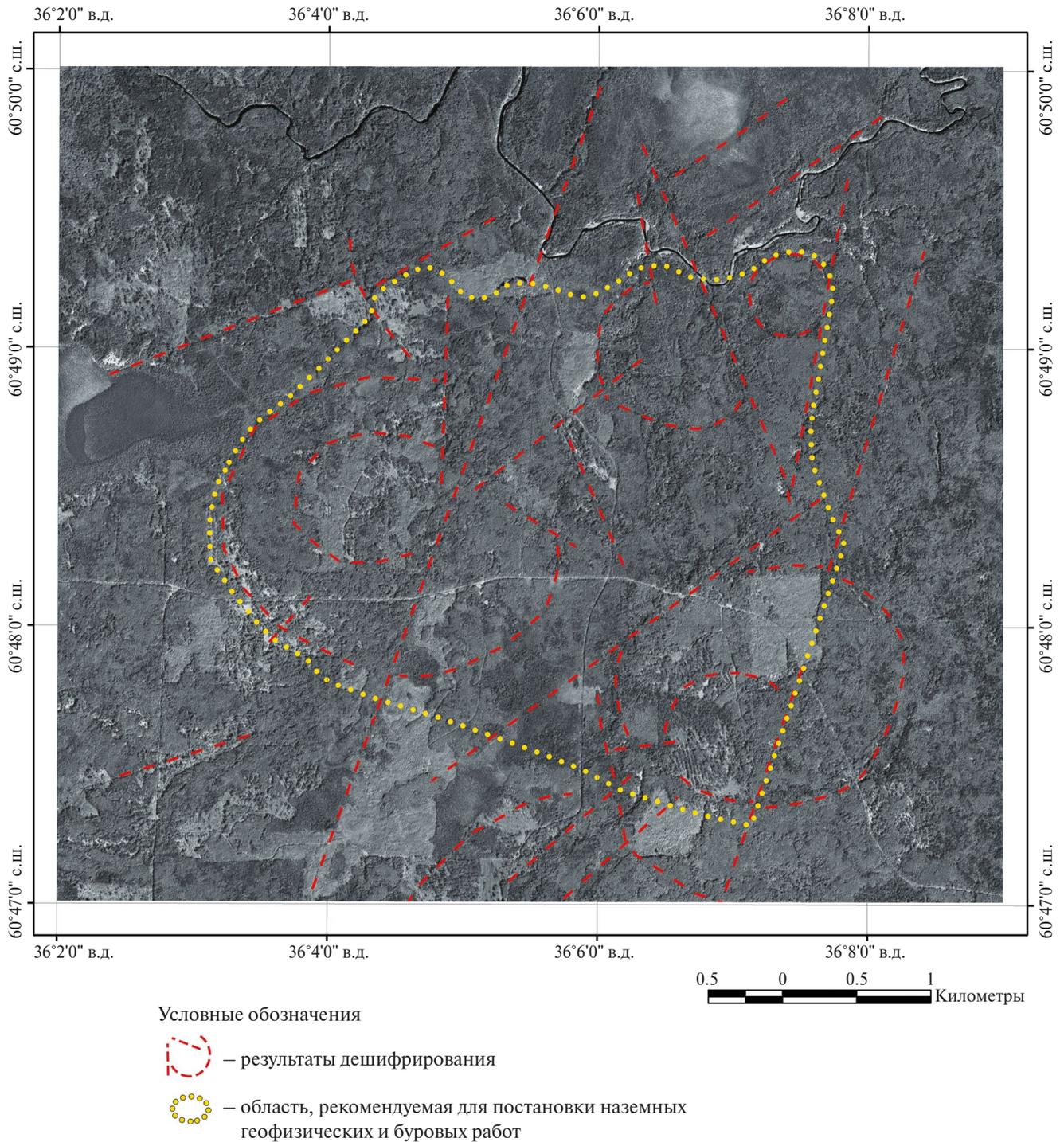


Рис. 7. Геологическая карта масштаба 1 : 200 000. Площадь детализации Лема.



**Рис. 8.** Результаты дешифрирования алмазонасного участка Катручейский.

Присутствие сапонита характерно именно для кимберлитов Архангельской провинции. По данным разведочного бурения на месторождении им. Ломоносова было установлено, что до глубины 160–170 м от поверхности туфогенные образования сильно окислены и имеют ржавый цвет, что свидетельствует о кислородной аэрации. Кислород в этом случае

может доноситься на такую глубину растворенным в грунтовых водах. Об этом свидетельствуют и реальные гидрогеологические условия месторождения: характер разреза кимберлитовмещающих пород из-за отсутствия надежных водоупоров вполне может обеспечивать промывной режим грунтовых вод на большую глубину.

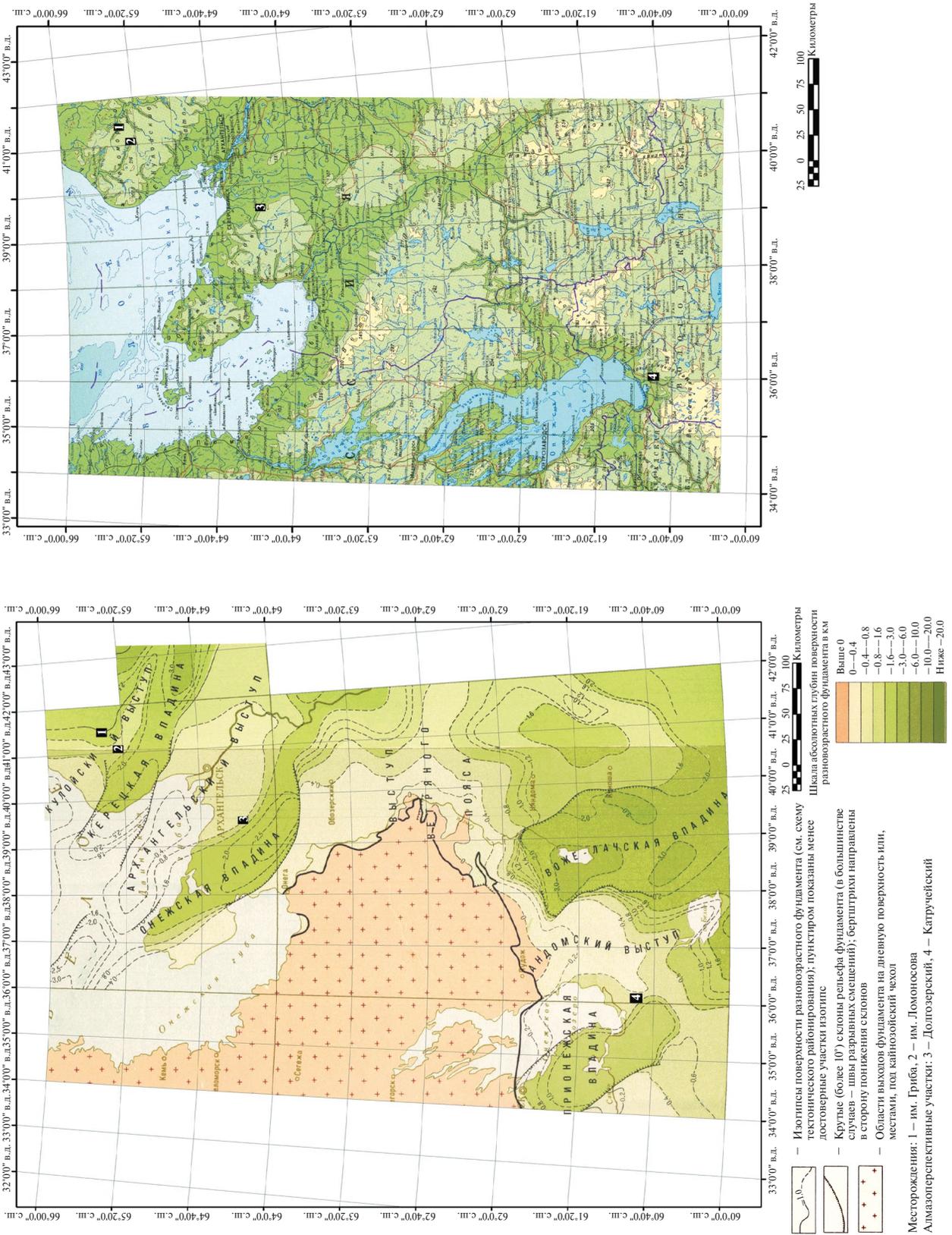


Рис. 9. Карта рельефа разновозрастного фундамента масштаба 1 : 2 500 000, 1975 г. (слева); географическая карта площади работ масштаба 1 : 2 500 000 (справа).

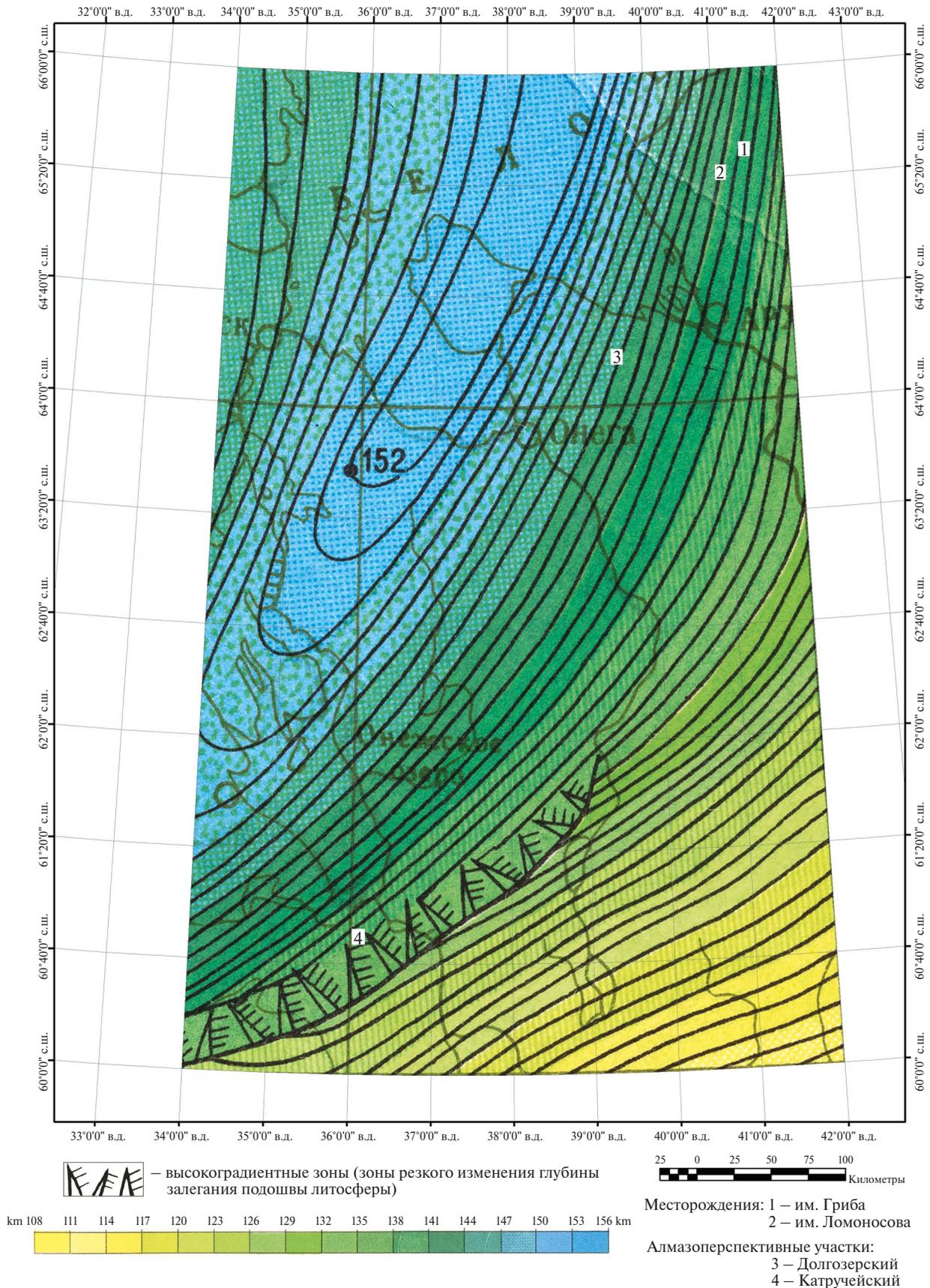


Рис. 10. Карта подошвы литосферы европейской части СССР масштаба 1 : 10 000 000, 1983 г.

По результатам опытно-методических работ ФГУНПП “Геологоразведка” кимберлитовые трубки достаточно четко фиксируются аномалиями подвижных форм элементов никелевой и редкометалльно-редкоземельной групп (Программа..., 2012). По результатам работ в районе Золотицкой группы, наиболее информативными элементами для выделения куста кимберлитовых тел являются: Li, Mg, Ni, La, Zn, Nd, Cu, Ca, Na, Be, Ba. В качестве обобщающего может использоваться комплексный мультипликационный показатель медь-никель-лантан. Вследствие того, что данные элементы содержатся в кимберлитах в повышенных концентрациях по отношению к вмещающим породам, по данному показателю формируются обширные зоны повышенных концентраций в почвах в районе отдельных кимберлитовых тел или их групп. Значительная площадь выделяемых положительных аномалий, вероятно, объясняется тем, что подвижные формы элементов, определяемые геоэлектрохимическими методами, могут мигрировать со значительных глубин, в результате чего измеряемый сигнал складывается из влияния собственно трубки и сигнала от глубинного источника.

В 2005–2008 годах в Архангельской области проводились поисковые геохимические работы по технологии, известной под названиями Radiello-Sorber и Gore-Sorber. Технология базируется на теории так называемого “дыхания недр”, при котором происходит микропросачивание углеводородных соединений от разломов глубинного заложения по трубкам взрыва к поверхности (“эффект каминной трубы”). На поверхности над продуктивными алмазоносными кимберлитовыми трубками четко выявляются высокие содержания углеводородов тяжелых фракций ( $C_{15}$ – $C_{20}$ ). Настоящая технология относится к геохимическим поискам алмазоносных кимберлитовых трубок методом пассивной адсорбции углеводородов почвенно-грунтовых газов в количестве более 80 органических соединений ряда от этана  $C_2$  до фитана  $C_{20}$  с точностью в пределах сотых долей нанограм ( $0.01 \times 10^{-9}$  грамм). Исследование хроматограмм показало, что продуктивная алмазоносная кимберлитовая трубка им. Гриба отличается от непродуктивной трубки № 402 (Верхотина), а также от известных не содержащих кимберлиты заведомо пустых аномалий № 439 и № 443.

Таким образом, представленные выше данные свидетельствуют о масштабных и разнообразных процессах массопереноса от тела кимберлитовой трубки сквозь чехол перекрывающих ее рыхлых пород к поверхности. Результаты этих процессов приводят к изменениям в поверхностном слое почво-грунтов и могут быть зарегистрированы в процессе проведения многозональной космической съемки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ АЛМАЗОНОСНОСТИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК

Для исследования различий эталонных кимберлитовых трубок месторождений им. Ломоносова от вмещающих и перекрывающих их пород выполнен расчет статистических характеристик многозональной космической съемки и проведен дискриминантный анализ с целью распознавания образов кимберлитовых трубок на фоне “пустых” пород. Эталонные кимберлитово-вмещающие породы представлены участками  $V_2pd_1$ ,  $V_2pd_2$ ,  $V_2pd_3$ , относящимися к падунской свите (рис. 1, табл. 1). Породы, перекрывающие кимберлитовые тела, представлены урзугской свитой (участки  $C_{2ur_1}$ ,  $C_{2ur_2}$ ,  $C_{2ur_3}$ ), воереченской свитой (участок  $C_{2ur_1}$ ), олмугской и окуневской свитами (участки  $C_{2ol-ok_1}$ ,  $C_{2ol-ok_2}$ ). Для оценки значимости различий расчетных статистических параметров эталонных объектов использованы F-критерий (Фишера) и t-критерий (Стьюдента), при уровне значимости  $\alpha = 0.05$ . F-критерий позволяет проверить гипотезу о равенстве двух генеральных дисперсий  $H_0: D(X) = D(Y)$  (при условии, что X и Y распределены нормально); t-критерий позволяет проверить нулевую гипотезу о равенстве генеральных средних  $H_0: M(X) = M(Y)$ , при условии, что X и Y распределены нормально с неизвестными, но равными дисперсиями. Если наблюдаемое значение t статистики T попадает в критическую область, то отказываются от гипотезы  $H_0$  (о равенстве средних значений двух выборок). Случайная величина T не очень чувствительна к условию нормальности распределения величин X и Y, ее можно применять и в том случае, когда статистические распределения обеих выборок имеют по одной вершине и достаточно симметричны, т.е. похожи на график функции нормального распределения. Гистограммы частот распределения яркостных характеристик по каналам KC Landsat и KC Ресурс-П даны в Приложениях П1, П2<sup>1</sup>.

Задачей распознавания образов является построение правила, позволяющего с наименьшей ошибкой предсказывать принадлежность объекта к одному из заданных классов по его описанию. Для распознавания эталонных объектов по различным спектральным каналам KC выбран метод линейного дискриминантного анализа. В пространстве наблюдаемых переменных для любого наблюдения можно вычислить его евклидовы расстояния от центра каждого класса. Мерой расстояния в си-

<sup>1</sup> Дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи: 10.31857/S0205961425030055.

**Таблица 1.** Эталонные объекты для обработки данных космической съемки

Кимберлитовые трубки			
Названия трубок	северная широта	восточная долгота	Примечания
Снегурочка	65°16'31''	41°00'48''	Забалансовые содержания
Архангельская	65°17'28''	41°01'16''	Эксплуатация
им. Карпинского–1	65°18'10''	41°01'30''	Эксплуатация
им. Карпинского–2	65°18'13''	41°01'59''	В плане 2028 г.
Пионерская	65°19'33''	41°03'16''	В плане 2032 г.
Поморская	65°20'45''	41°05'16''	Эксплуатация
им. Ломоносова	65°21'58''	41°04'06''	В плане 2040 г.
Кольцовская	65°23'08''	41°03'29''	Забалансовые содержания
Белая	65°23'30''	41°03'38''	Забалансовые содержания
Первомайская	65°23'45''	41°03'53''	Забалансовые содержания
им. Гриба	65°30'26''	41°25'24''	Эксплуатация
Участки вмещающих и перекрывающих пород			
Названия участков (и их площади)	северная широта	восточная долгота	Примечания
V <sub>2</sub> pd_1 (17.01 га)	65°22'14"	40°59'27"	Падунская свита (песчаники с прослоями алевролитов)
V <sub>2</sub> pd_2 (15.21 га)	65°22'21"	41°01'56"	— II —
V <sub>2</sub> pd_3 (16.47 га)	65°22'26"	41°06'17"	— II —
C <sub>2</sub> ur_1 (15.93 га)	65°22'57"	41°00'34"	Урзугская свита (песчаники с прослоями глин и гравелитов)
C <sub>2</sub> ur_2 (16.47 га)	65°22'22"	41°08'53"	— II —
C <sub>2</sub> ur_3 (10.89 га)	65°16'24"	41°03'47"	— II —
C <sub>2</sub> vr_1 (17.10 га)	65°20'17"	41°00'52"	Воереченская свита (известняки, доломитизированные известняки с прослоями известковистых глин)
C <sub>2</sub> ol-ok_1 (16.20 га)	65°20'43"	41°00'54"	Олмугская и Окуневская свиты (известняки, доломитизированные известняки, доломиты)
C <sub>2</sub> ol-ok_2 (16.47 га)	65°21'55"	41°07'56"	— II —

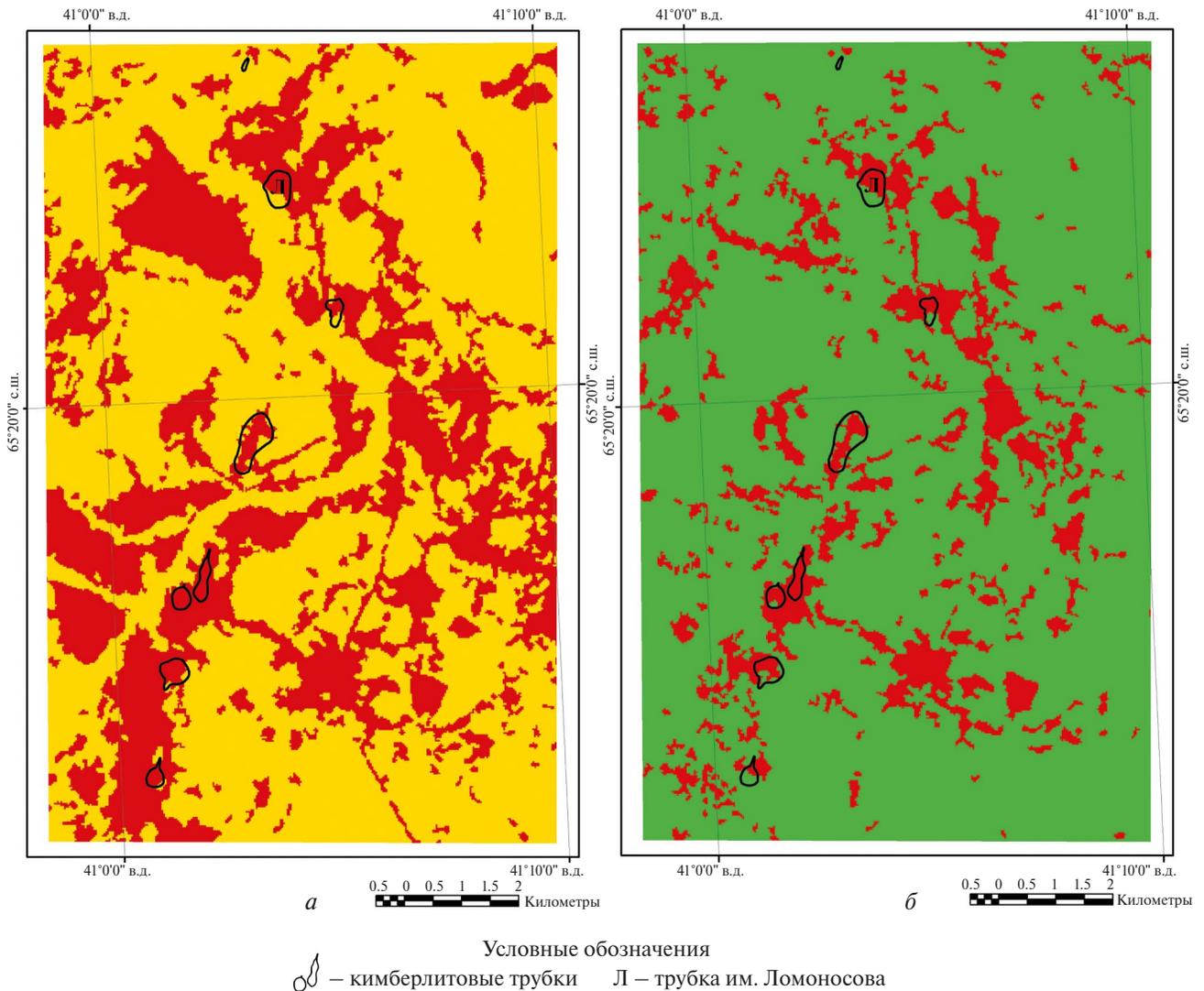
туации дискриминантного анализа является расстояние Махаланобиса. Цель дискриминантного анализа – получение правила, позволяющего на основе наблюдаемых значений количественных независимых переменных X предсказать значение качественной переменной Y, указывающей на принадлежность наблюдения к одному из заданных классов.

Трубка им. Ломоносова взята за эталон, так как над ней перекрывающие породы среднекаменноугольного возраста полностью эродированы. Сравнение спектральных каналов космической съемки по этой трубке проводилось с эталонными площадками падунской свиты – V<sub>2</sub>pd\_1, V<sub>2</sub>pd\_2, V<sub>2</sub>pd\_3. Трубка Пионерская, перекрытая среднекаменноугольными отложениями воереченской и олмуго-

окуневской свит, сравнивалась по спектральным каналам КС с эталонными площадками –  $C_{2ur\_1}$ ,  $C_{2ol-ok\_1}$ ,  $C_{2ol-ok\_2}$ . Слабоалмазоносная трубка Снегурочка, частично перекрытая среднекаменноугольными отложениями урзугской свиты, сравнивалась с эталонными площадками –  $C_{2ur\_1}$ ,  $C_{2ur\_2}$ ,  $C_{2ur\_3}$ . Для сравнения исследовалась трубка Архангельская, на которой карьером вскрыты кимберлиты и вмещающие породы. Трубки им. Карпинского-1,2 не рассматривались, т.к. одна из них частично вскрыта карьером, а другая отличается наличием технической инфраструктуры, связанной с подготовкой трубки к эксплуатации в 2028 г. Трубка Поморская и слабоалмазоносные трубки Кольцовская, Белая, Первомайская из-за небольших размеров из рассмотрения исключены.

Эталонные площади пород падунской, урзугской, воереческой и олмуго-окуневской свит в большинстве спектральных каналов КС имеют на гистограмме частот одномодальный вид. Для кимберлитовых трубок одномодальный график частот характерен для 1, 2, 3 и частично 7 каналов КС.

Распознавание методом расстояния Махаланобиса алмазоносных кимберлитовых трубок от вмещающих “пустых” проведено между парами: трубка им. Ломоносова – эталон  $V_{2pd\_1}$ ; трубка им. Ломоносова – эталон  $V_{2pd\_2}$ ; трубка Архангельская – эталон  $V_{2pd\_2}$ , трубка Архангельская – эталон  $C_{2ur\_2}$  (рис. 11, 12). Области, которые в результате распознавания выделены как тип “трубка” показаны красным цветом. Характерно, что в красную область попадают все трубки месторождения

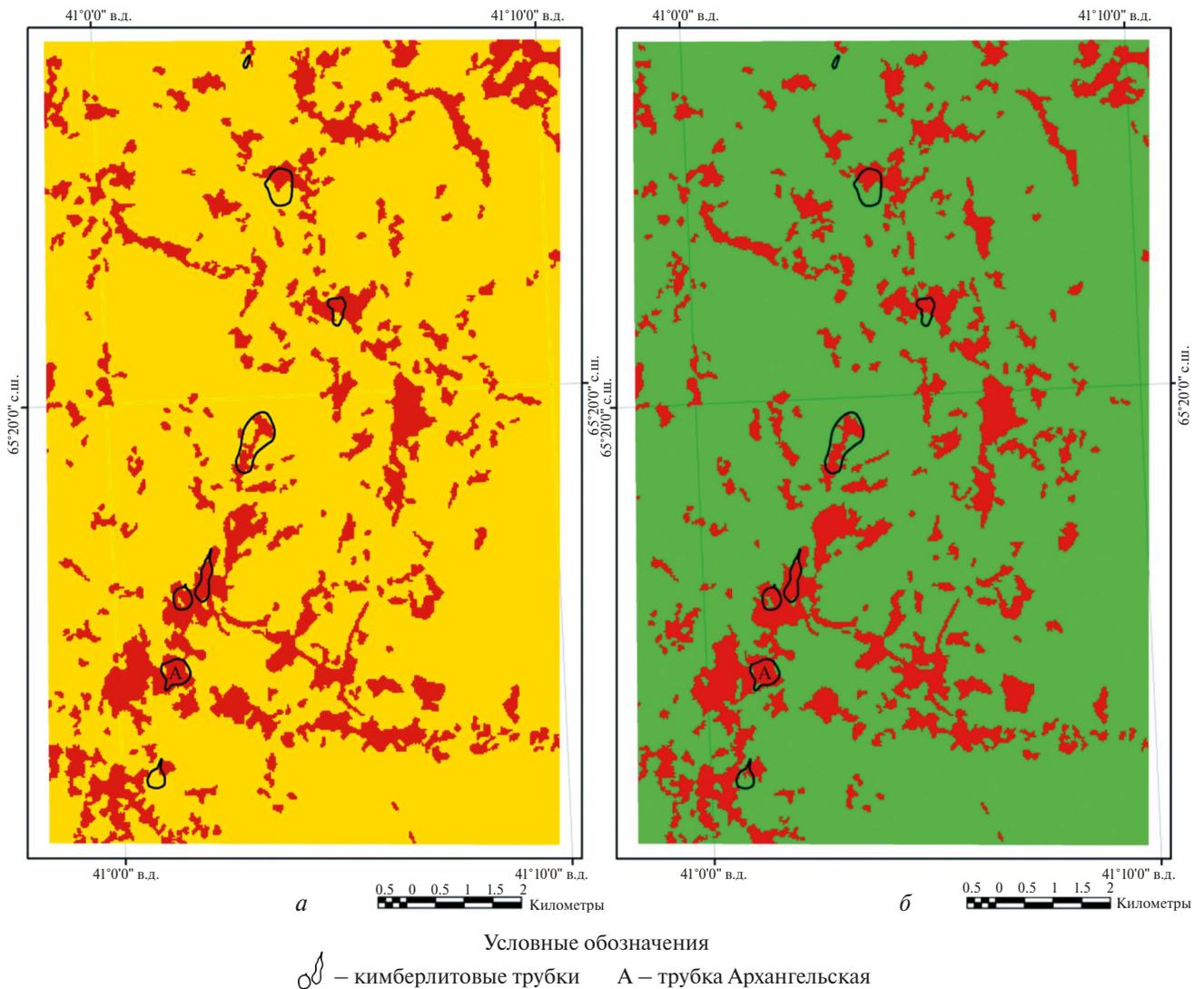


**Рис. 11.** Классификация кимберлитовой трубки им. Ломоносова и вмещающих пород с помощью метода расстояния Махаланобиса (каналы Landsat-1,2,3): *a* – трубка им. Ломоносова (красный), вмещающие породы  $V_{2pd\_1}$  (желтый); *б* – трубка им. Ломоносова (красный), вмещающие породы  $V_{2pd\_2}$  (зеленый).

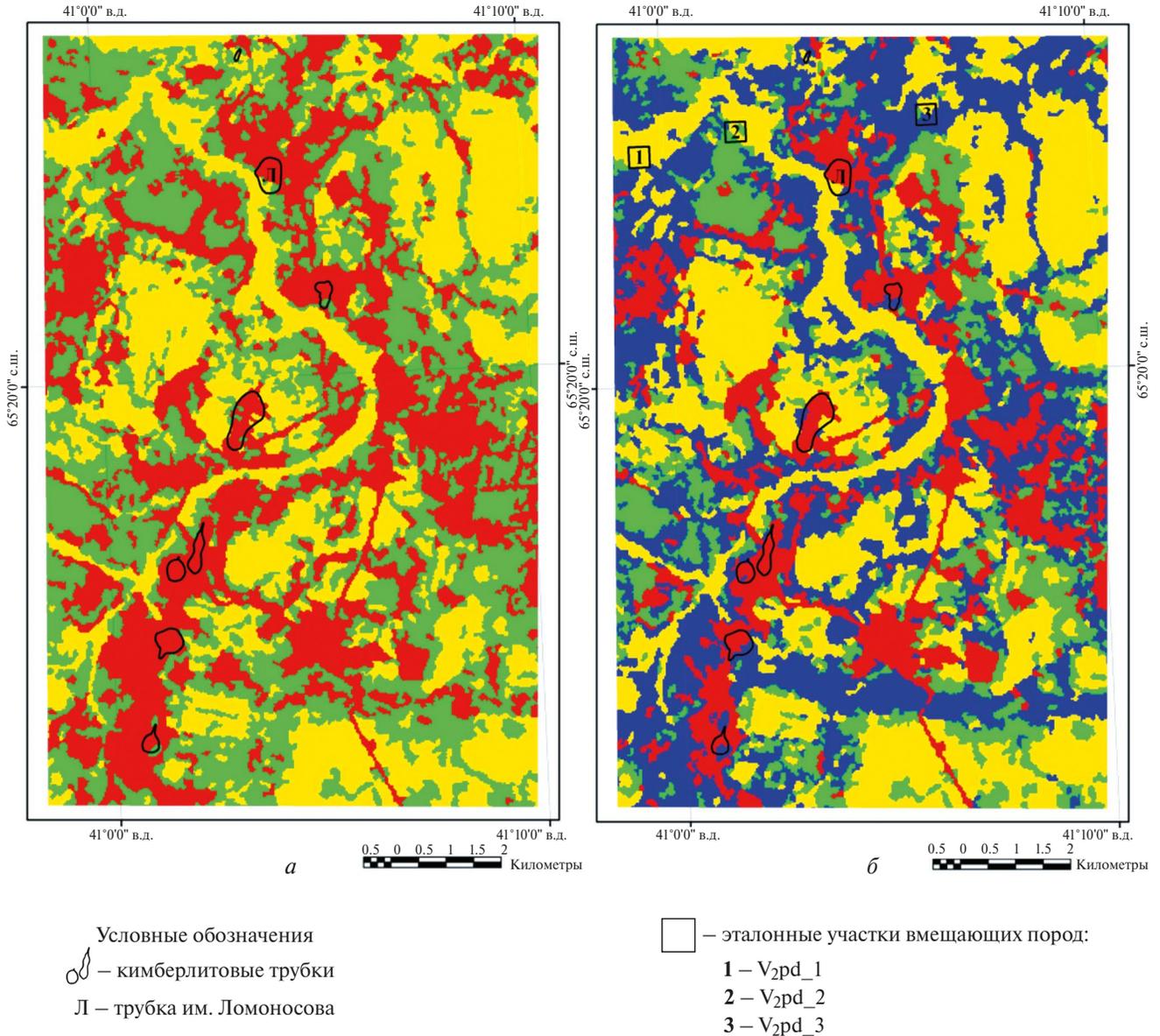
им. Ломоносова; участки, расположенные западнее и восточнее месторождения, также попадающие в красную область, в значительной своей части совпадают с техногенными объектами: отвалы вскрышных пород и некондиционных руд, промплощадки, дорожная сеть и др. объекты. Вариации с каналами КС и количеством эталонов – “пород” на результатах распознавания сказываются не очень существенно (рис. 11, 13). Распознавание по эталонным трубкам Пионерская и Снегурочка представлено на рис. 14, 15.

Следует отметить, что при распознавании кимберлитовых трубок и вмещающих пород падунской свиты все эталонные площади  $V_2pd\_1$ ,  $V_2pd\_2$ ,  $V_2pd\_3$  на рисунках диагностируются уверенно. Для терригенной урзугской свиты (непосредствен-

но перекрывающей отложения падунской свиты) эталонные участки  $C_{2ur\_1}$ ,  $C_{2ur\_2}$ ,  $C_{2ur\_3}$  также достаточно хорошо идентифицируются на рисунках. В то же время карбонатные отложения воевеченской и олмуго-окуневской свит, залегающих выше урзугской, слабо распознаются как методом расстояния Махаланобиса, так и методом спектрального угла. Результаты распознавания методом расстояния Махаланобиса можно считать удовлетворительными, если все исследуемые объекты как кимберлитовые трубки (красным), так и эталонные вмещающие породы (желтым, зеленым, синим) в результате распознавания соответствуют по цвету на изображении цветам, заданным этим объектам изначально. Степень эффективности распознавания можно оценить, сравнивая площадь известных объектов с площадью того же цвета в целом



**Рис. 12.** Классификация кимберлитовой трубки Архангельская с помощью метода расстояния Махаланобиса (каналы Landsat-1,2,3): *а* – трубка Архангельская (красный), вмещающие породы  $V_2pd\_2$  (желтый); *б* – трубка Архангельская (красный), перекрывающие породы  $C_{2ur\_2}$  (зеленый).

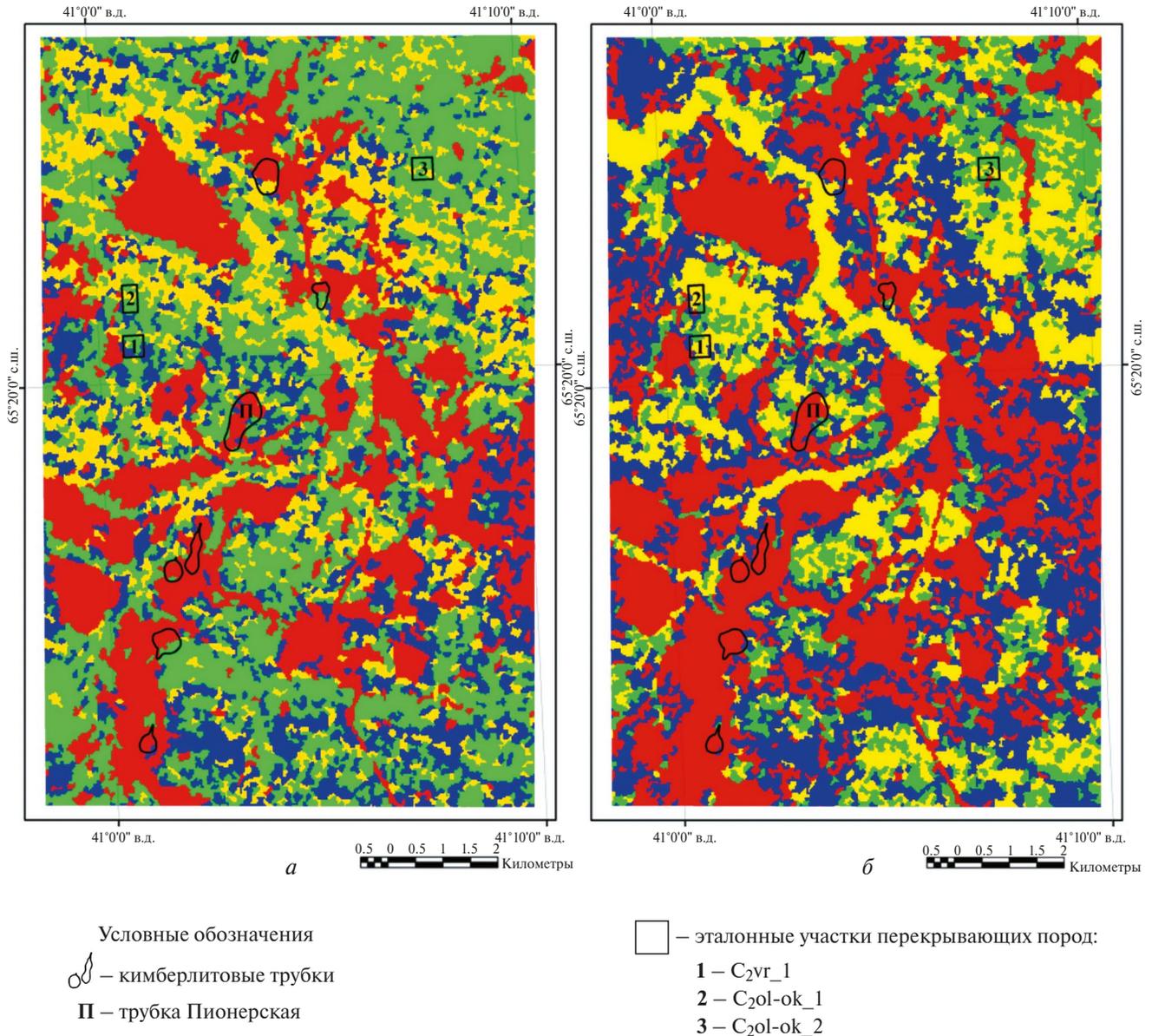


**Рис. 13.** Кимберлитовая трубка им. Ломоносова и вмещающие породы. Классификация методом расстояния Махаланобиса (каналы Landsat-1,2,3,7): *a* – трубка им. Ломоносова (красный); вмещающие породы V<sub>2</sub>pd\_1, V<sub>2</sub>pd\_2 (желтый, зеленый); *б* – трубка им. Ломоносова (красный); вмещающие породы V<sub>2</sub>pd\_1, V<sub>2</sub>pd\_2, V<sub>2</sub>pd\_3 (желтый, зеленый, синий)

на изображении. Например, если кимберлитовые трубки (отображаются красным цветом) занимают 50% площади, отмеченной красным цветом на всем изображении, результат можно считать хорошим, т.к. области красного цвета на изображении за пределами трубок соответствуют различным техногенным площадным объектам, связанным с деятельностью рудника и извлечением горной массы. Наличие перекрывающих четвертичных отложений существенным образом сказывается на качестве результата распознавания, вместе с тем, следует отметить, что главная линейная

зона субмеридионального простирания, к которой приурочены все трубки месторождения, отчетливо фиксируется при использовании различных трубок в качестве эталонов.

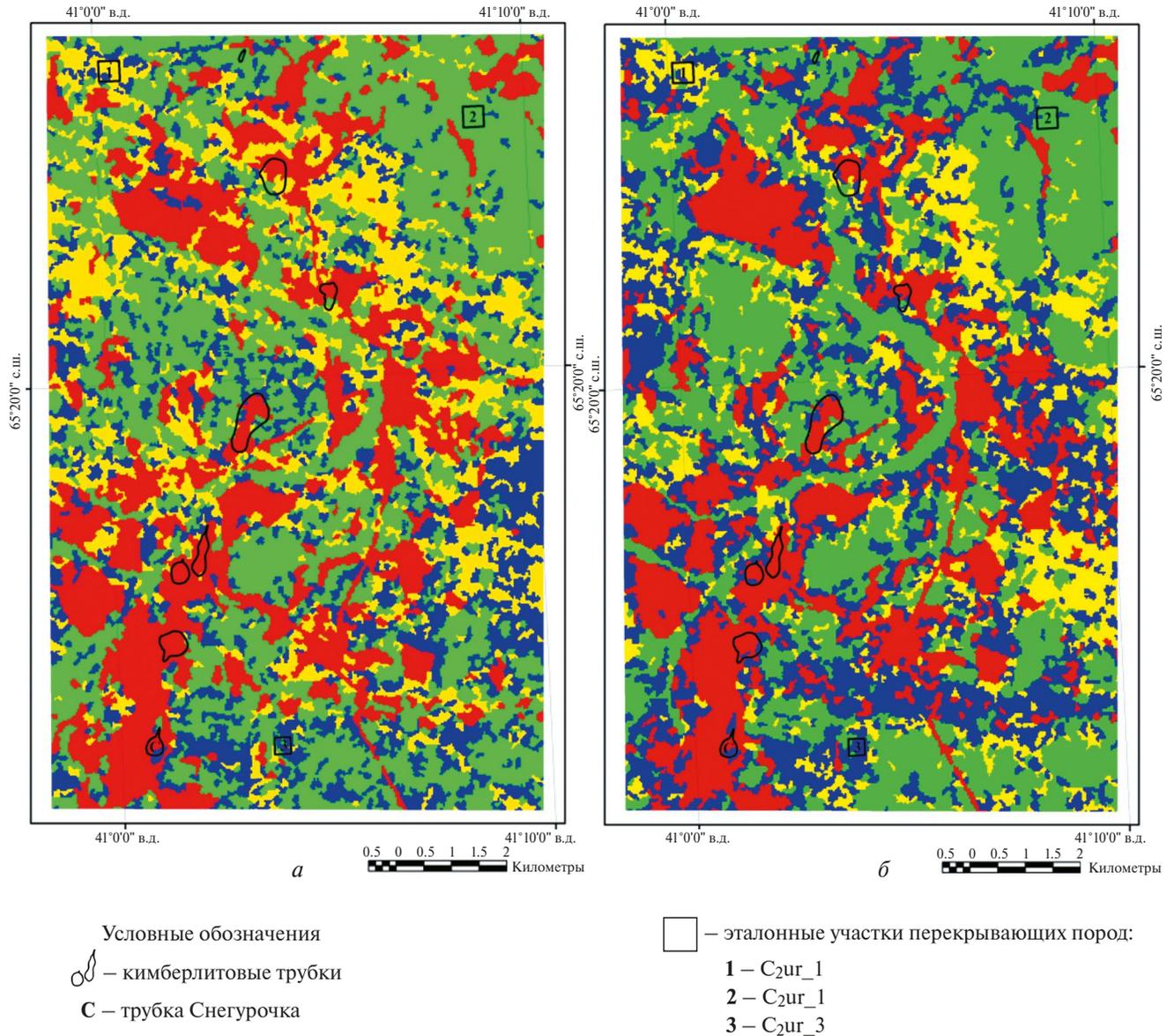
На площади детализации Урзуга выполнена классификация методом расстояния Махаланобиса трубок месторождения им. Ломоносова – тип “трубки”, с вмещающими и перекрывающими породами – тип “породы” (рис. 16). В результате в красной области оказалась зона Урзугского глубинного разлома северо-западного простирания и участки, рекомендуемые для наземных заверочных работ.



**Рис. 14.** Кимберлитовая трубка Пионерская (красный) и перекрывающие породы: C<sub>2</sub>vg\_1, C<sub>2</sub>ol-ok\_1, C<sub>2</sub>ol-ok\_2 (желтый, зеленый, синий). Классификация (каналы Landsat-1,2,3): а – методом расстояния Махаланобиса; б – методом спектрального угла.

Применяемые сегодня прогнозно-поисковые критерии и признаки нацелены на выделение кимберлитов безотносительно их алмазности. Вместе с тем, в первую очередь необходимо оценивать вероятность обнаружения именно алмазных кимберлитов. В настоящее время обоснованными считаются прямые поисковые признаки алмазности, то есть те особенности состава глубинных минералов – спутников алмазов (МСА): пиропов, хромшпинелидов и др., которые обнаруживают значимую корреляцию с уровнем алмазности пород. Даже при максимальном совпа-

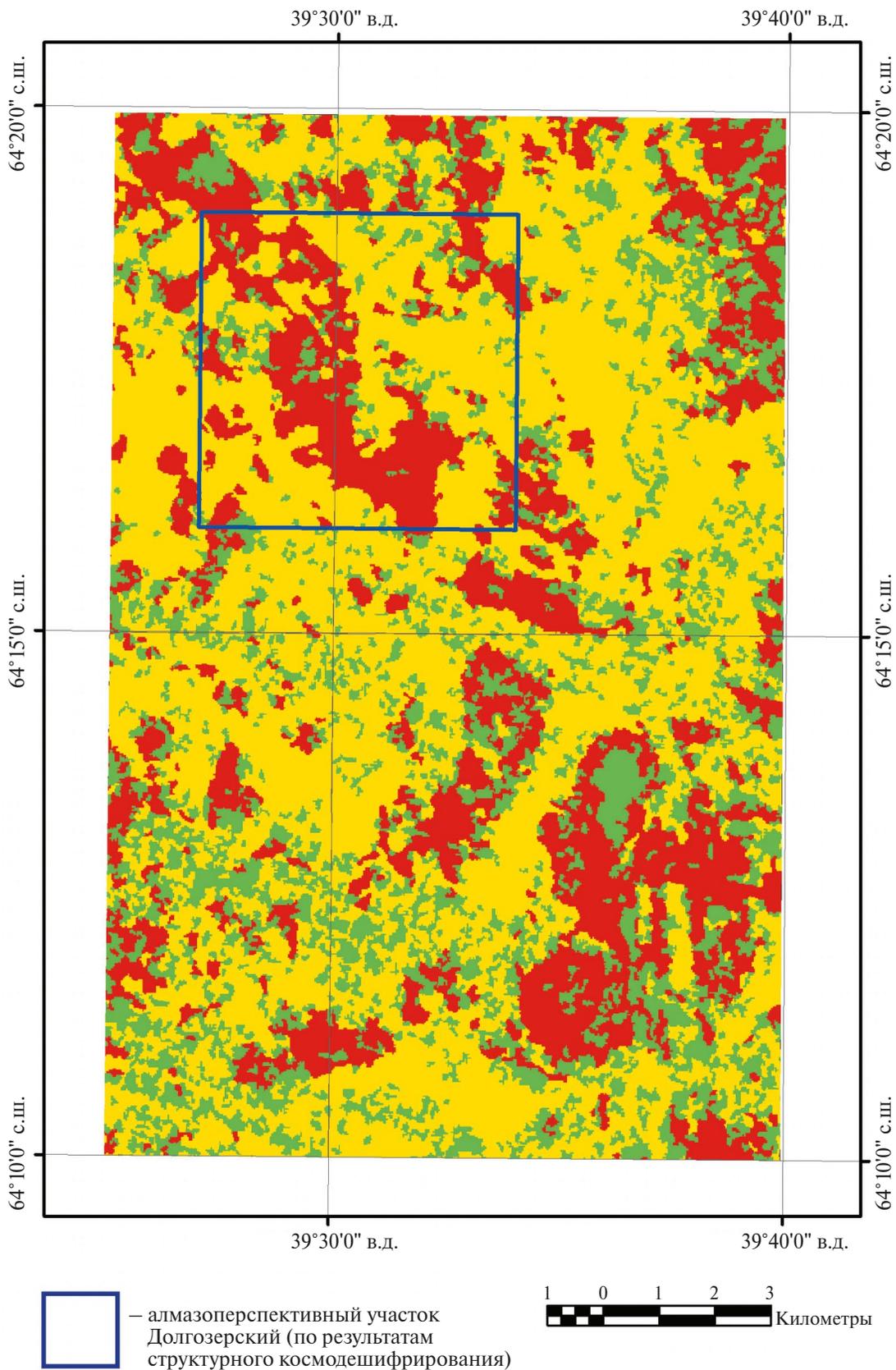
дении благоприятных критериев алмазности при обнаружении нового кимберлитового поля, одна алмазная трубка будет приходиться на десятки пустых; наличие МСА в пределах поискового объекта не всегда гарантирует наличие самого алмаза, наоборот, отсутствие МСА не всегда говорит об отсутствии алмазов (Кусов, 2011). Б.Р. Кусов обращает особое внимание на тот факт, что единственным минералом, сопровождающим алмаз в породах любого генезиса, включая карбонатиты, щелочные базальтоиды и др., является графит, но не минералы-спутники алмаза, и даже не



**Рис. 15.** Кимберлитовая трубка Снегурочка (красный) и перекрывающие породы: C<sub>2ur</sub>\_1, C<sub>2ur</sub>\_2, C<sub>2ur</sub>\_3 (желтый, зеленый, синий). Классификация (Landsat-1,2,3): *a* – методом расстояния Махаланобиса; *б* – методом спектрального угла.

разновидности их. Этот факт лишний раз говорит о генетической связи алмаза с графитом, а также о том, что алмазы в известных к настоящему времени месторождениях образовались в условиях земной коры. Если бы они образовались на глубинах 200–250 км с высокими термобарическими условиями, достаточными для превращения графита в алмаз, то весь графит превратился бы в алмазы. Совместное нахождение алмаза и графита во всех месторождениях свидетельствует о том, что термобарические условия, необходимые для кристаллизации алмаза, возникали локально и дифференцированно по величине (Кусов, 2011). Э.М. Галимовым отмечается, что наблюда-

емые вариации изотопного состава алмазов могут быть обусловлены либо изотопным фракционированием в закрытой системе, либо поступлением углерода из внешнего источника (Галимов, 1984). Доказательством того, что алмаз образуется из графита осадочных пород, служит факт корреляции алмазоносности трубок с содержанием в них ксенолитов осадочных пород. Причем эта связь обнаруживается как в пределах отдельных диатрем, так и на уровне отдельных кимберлитовых полей (Кусов, 2011). Нефтегазопроявления различного характера и масштаба были зафиксированы при проведении разведочных работ на многих кимберлитовых трубках Якутской алмазоносной про-



**Рис. 16.** Площадь детализации Урзуга. Классификация методом расстояния Махаланобиса (каналы Landsat-1,2,3): участки подобные кимберлитовым трубкам месторождения им. Ломоносова (красный), перекрывающие и вмещающие породы (желтый, зеленый).

винции. Наиболее интенсивные газопроявления были обнаружены при бурении скважин на трубке Удачная. Пространственная приуроченность месторождений алмазов к зонам распространения углеродсодержащих полезных ископаемых нефтяного ряда имеет причинно-следственную природу. При термическом воздействии на УВ происходит их обогащение углеродом через удаление водорода вплоть до превращения в графит. Изложенная Б.Р. Кусовым схема процесса алмазообразования (Кусов, 2011) объясняет многие факты, которые до сих пор не находят своего объяснения, но имеют прямое или косвенное отношение к генезису алмаза. Становится понятным, почему при, казалось бы, прочих равных условиях алмазоносной является малая доля кимберлитовых трубок даже в пределах одного и того же поля: если в толще пород, прорванных магматическим расплавом при формировании диатрем, УВ или продукты их метаморфизма отсутствовали, то алмазам не из чего было образоваться. Объясняется также факт широкого диапазона размеров кристаллов алмаза – от долей миллиметра до нескольких сантиметров при резком преобладании мелких размеров: таково соотношение размеров различных пустот в горных породах, которые изначально насыщались УВ. Как правило, в карбонатных породах по сравнению с песчано-глинистыми общий объем пустотного пространства выше, а размеры отдельных каверн доходят до нескольких сантиметров, что и проявляется в особенностях алмазоносности некоторых месторождений. Механизм формирования полости трубки взрыва является одним из главных факторов, отличающих, при прочих равных условиях, диатремы от других вулканических и интрузивных тел по алмазоносности (Кусов, 2011).

Процитированные выше фрагменты из монографии Б.Р. Кусова показывают, что алмазоносность кимберлитовых трубок в значительной степени определяется (при наличии УВ во вмещающих породах) условиями формирования кратерной и жерловой частей трубки, которые проявляются при крупномасштабном дешифрировании локальных структур околотрубочного пространства. Как отмечают А.С. Гладков и др. (Гладков, 2008) разломно-блоковая тектоника играет существенную роль в пространственном размещении кимберлитовых тел начиная с локального уровня, с увеличением масштаба все большее значение для контроля кимберлитового магматизма приобретают структуры платформенного чехла и, в конечном счете, его приповерхностных слоев. Таким образом, подтверждается необходимость использования многозональной и панхроматической космической съемки высокого разрешения в масштабе 1:15000 – 1:5000 при исследовании структурных особенностей локализации отдельных кимберлитовых тел для независимой

оценки границ кимберлитовых полей и потенциальной алмазоносности кустов кимберлитовых трубок в их пределах.

## ВЫВОДЫ

Разработаны методические приемы прогнозирования алмазоперспективных участков на основе компьютерной обработки данных дистанционного зондирования, которые включают дешифрирование структурных элементов (линеаментов), контролирующих пространственное расположение алмазоносных кимберлитовых трубок и применение дискриминантного анализа для разбраковки участков тестируемой территории по принципу “месторождение” – “порода” на основе количественных различий яркостных характеристик по индикаторным каналам КС, определенных на основе изучения эталонных объектов (конкретных месторождений и выбранных площадей “пустых” пород примерно равных по площади друг другу).

В результате выполненных исследований выявлены алмазоперспективные участки в Архангельской и Вологодской областях России. Показано важное значение комплексирования геолого-структурных и геофизических данных с результатами обработки многозональной космической съемки, в том числе высокого разрешения, для определения границ алмазоперспективных участков на площадях, перекрытых чехлом четвертичных и среднекаменноугольных отложений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев С.Г., Бочков П.А., Сенчина Н.П., Штолкаленко М.Б.* Визуализация в потенциальных полях мантийно-коровых структур, контролирующих кимберлитовый и лампроитовый магматизм // Проблемы минерогенеза, экономической геологии и минеральных ресурсов. Смирновский сборник. Под ред. В.И. Старостина; Фонд им. Академика В.И. Смирнова. Москва; МАКС Пресс, 2018, с. 292–305.
- Антонова И.Б.* Методика поисков трубок взрыва в условиях развитого осадочного чехла северо-запада СССР на материалах дистанционных съемок // Принципы и методика дистанционных исследований при прогнозировании твердых полезных ископаемых. Сб. науч. трудов // Всесоюз. н.-и. геол. ин-т им. А.П. Карпинского; (Отв. ред. Д.В. Лопатин). СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. С. 113–122.
- Ваганов В.И., Варламов В.И., Фельдман А.А., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А., Олофинский Л.Н., Бойко А.Н.* Прогнозно-поисковые системы для месторождений алмазов // Отечественная геология. 1995. № 3. С. 42–52.
- Ваганов В.И., Волчков А.Г., Кочнев-Первухов В.И.* Пространственные металлогенетические таксоны. Серия “Модели месторождений алмазов, благородных и цветных металлов”: Справочное пособие. М.: ЦНИГРИ. 2002. 82 с.
- Галимов Э.М.* <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C алмазов. Вертикальная зональность алмазообразования в литосфере // Геохимия и космохимия.

27-й Международный геологический конгресс. Москва, 4–14 августа 1984 г. Секция с. 11, том. 11, с. 110–123.

*Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А.* Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах. Методическое пособие. М.: Научный мир, 2008. – 175 с.

*Горев Н.И., Коробков И.Г., Иванов В.М. и др.* Отчет о проведении научно-исследовательских работ по теме: «Прогнозный мониторинг геологоразведочной деятельности АК “АЛРОСА” (ЗАО) на Сибирской платформе на основе составления специализированных на алмазы разномасштабных карт» в 2002–2005 гг. (объект “Прогнозный-2”) в 3 кн. Росгеолфонд. Инв. № 485957. ЯНИГП ЦНИГРИ АК “АЛРОСА”, 2005 г.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000, серия Онежская, листы Q-37-XXXIII, XXXIV. Зоренко Т.Н., Черемхина Г.М., Корепанов В.С. и др. 2000. 118 с.

*Кусов Б.Р.* Генезис некоторых углеродосодержащих полезных ископаемых (от метана до алмаза): Монография. Издание второе, дополненное. Владикавказ, ИПО СОИГСИ, 2011. 195 с.

*Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазонасной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ОАО “ИПП Правда Севера”, 2004. 284 с.

*Лопатин Д.В.* Поиски трубок взрыва на территории Восточно-Европейской платформы с использованием аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2001. № 1. С. 62–72.

*Миловский Г.А., Орлянкин В.Н., Ишмухаметова В.Т., Минин В.П.* Применение космической съемки высокого разрешения “РЕСУРС-П (ГЕОТОН)” для прогноза алмазонасных кимберлитов в Зимнебережной минерагенической зоне (Архангельская область). Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 3–13.

*Подчасов В.М., Минорин В.Е., Богатых И.Я. и др.* Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения. Якутск: ЯФ ГУ Издательство СО РАН, 2004. 548 с.

Программа проведения опытно-методических работ на лицензионных площадях АК “АЛРОСА” (ОАО) и ПАО “Севералмаз” для корректировки существующих методов поисков коренных месторождений алмазов в Северо-Западном регионе РФ на 2013–2021 гг. (пояснительная записка). Архангельск, 2012.

*Прусакова Н.А., Громцев К.В., Лантев М.М.* Геолого-геофизические предпосылки выделения перспективных площадей для постановки поисковых работ на коренные месторождения алмазов // Руды и металлы. 2021. № 3. С. 22–45.

*Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М.* Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 198 с.

Схематическая тектоническая карта довендских образований Q-(35)-37. М. 1:2500000. ВСЕГЕИ, 2003 г.

*Устинов В.Н., Антащук М.Г., Загайный А.К., Кукуй И.М., Лобкова Л.П., Микоев И.И., Антонов С.А.* Перспективы выявления месторождений алмазов на севере Восточно-Европейской платформы // Руды и металлы. 2018. № 1. С. 11–26.

*Фолисевиц М.Я., Кирий А.Н., Литовская М.Д. и др.* Отчет о ревизионно-поисковых работах масштаба 1:500000 по оценке перспектив коренной алмазонасности Лено-Анабарского междуречья в 1995–1999 гг. (в 7-ми томах). Росгеолфонд. Инв. № 476859. Амакинская ГРЭ АК “АЛРОСА”, 2000 г.

*Шпилевая Д.В.* Геологическое строение, минеральный состав и эколого-экономические аспекты освоения трубки Архангельская (месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова): автореф. дисс. на соискание ученой степени к.г.-м.н. по спец-ти: 25.00.11 М.: 2008.

## Application of Multispectral Landsat and Resource-P Space Survey for Forecasting Diamond Bearing Kimberlites in the Arkhangelsk and Vologda Regions of Russia

G. A. Milovsky<sup>1</sup>, A. D. Aparin<sup>1</sup>, N. O. Esmanskaya<sup>1</sup>, Yu. A. Ivanova<sup>1</sup>, A. I. Nikitin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geographic Information Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A comprehensive study of space and geological-geophysical survey materials was performed to predict diamond-bearing kimberlites in the Arkhangelsk and Vologda regions of Russia. New methods of computer processing of multispectral space survey materials were developed to identify diamond-promising areas in areas covered by a cover of Quaternary and Middle Carboniferous deposits. The important role of high-resolution space survey Resurs-P for studying local structures that control the placement of kimberlite pipes is shown.

**Keywords:** multispectral space survey, geological and geophysical data, searching signs, kimberlites, diamonds

### REFERENCES

- Alekseev S.G., Bochkov P.A., Senchina N.P., Shtolkalenko M.B.* Visualization in potential fields of mantle-crust structures controlling kimberlite and lamproite magmatism // Problems of minerageny, economic geology and mineral resources. Smirnov collection. Ed. V.I. Starostin; Academician V.I. Smirnov Foundation. – Moscow; MAKS Press, 2018, p. 292–305. (In Russian).
- Antonova I.B.* Metodika poiskov trubok vzryva v usloviyah razvitygo osadochnogo chekhla severo-zapada SSSR na materialah distancionnyh s"emok [Method of searching for explosion pipes in conditions of developed sedimentary covering of the north-west of the USSR on materials of remote shooting] // Principy i metodika distancionnyh issledovaniy pri prognozirovanii tverdyh poleznyh iskopaemyh. Sb. nauch. trudov / Pod. red. D.V. Lopatina. SPb.: VSEGEI, 1992. P. 113–122. (In Russian).
- Vaganov V.I., Varlamov V.I., Fel'dman A.A., Golubev Yu.K., Prusakova N.A., Olofinskij L.N., Bojko A.N.* Prognozno poiskovye sistemy dlya mestorozhdenij almazov [Forecast and search engines for diamond deposits] // Otechestvennaya geologiya. 1995. № 3. P. 42–52. (In Russian).
- Vaganov V.I., Volchkov A.G., Kochnev-Pervuhov V.I.* Prostranstvennyye metallogenicheskie taksony. Seriya "Modeli mestorozhdenij almazov, blagorodnyh i cvetnyh metallov" [Spatial metallogenichesky taxons. Series "Models of deposits of diamonds, noble and non-ferrous metals"]: Spravochnoe posobie. M.: CNIGRI. 2002. 82 p. (In Russian).
- Galimov E.M.* <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C diamonds. Vertical zoning of diamond formation in the lithosphere // Geochemistry and Cosmochemistry. 27th International Geological Congress. Moscow, August 4–14, 1984 Section p. 11, vol. 11, p. 110–123. (In Russian).
- Gladkov A.S., Bornyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A.* Tektonofizicheskie issledovaniya pri almazoposkovykh rabotah. Metodicheskoe posobie [Tectonophysical studies in diamond exploration. Methodical grant]. M.: Nauchnyj mir, 2008. 175 p. (In Russian).
- Gorev N.I., Korobkov I.G., Ivanov V.M. et al.* Otchet o provedenie nauchno-issledovatel'skih rabot po teme: "Prognoznyy monitoring geologorazvedochnoj deyatel'nosti AK "ALROSA" (ZAO) na Sibirskoj platforme na osnove sostavleniya specializirovannyh na almazy raznomasshtabnyh kart" v 2002–2005 gg. (ob"ekt "Prognoznyj-2") v 3 kn. [Report on carrying out research works on the topic: "Forecast monitoring of geological exploration activities of ALROSA AK (ZAO) on the Siberian platform on the basis of compilation of different scale maps specialized for diamonds" in 2002–2005 (object "Forecast-2") in 3 books]. Rosgeolfond. Inv. № 485957. YANIGP CNIGRI AK "ALROSA", 2005. (In Russian).
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200000, Onega series, sheets Q-37-XXXIII, XXXIV. Zorenko T.N., Cheremkhina G.M., Korepanov V.S., et al. 2000. – 118 p. (In Russian).
- Kusov B.R.* Genesis of some carbon-containing minerals (from methane to diamond): Monograph. Second edition, supplemented. Vladikavkaz, IPO SOIGSI, 2011. – 195 p. (In Russian).
- Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Ierarhicheskij ryad proyavlenij shchelochno-ul'traosnovnogo magmatizma Arhangel'skoj amazonosnoj provincii. Ih otrazhenie v geologo-geofizicheskikh materialah [Hierarchical series of manifestations of alkaline-ultra-basic magmatism of the Archangel diamond-bearing province. Their reflection in geological and geophysical materials]. Arhangel'sk: IPP Pravda Severa, 2004. 284 p. (In Russian).
- Lopatin D.V.* Poiski trubok vzryva na territorii Vostochno-Evropejskoj platformy s ispol'zovaniem aerokosmicheskoy informacii [Search for explosion pipes on the East European Platform using aerospace information] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2001. № 1. P. 62–72. (In Russian).
- Milovsky G.A., Orlyankin V.N., Ishmukhametova V.T., Minin V.P.* Application of High Resolution Space Shoot "Resource-P (Geoton)" for Forecasting Diamond Bearing Kimberlites in the Wintercoast Mineragenic Zone (Arkhangelsk Region) // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2020. № 3. P. 3–13. (In Russian).
- Podchasov V.M., Minorin V.E., Bogatyh I.Ya. i dr.* Geologiya, prognozirovaniye, metodika poiskov, ocenki i razvedki kornykh mestorozhdenij almazov. Kniga 1. Korennyye mestorozhdeniya [Geology, forecasting, techniques for prospecting, evaluating and exploring indigenous diamond deposits. Book 1. Bedrock fields]. Yakutsk: YAF GU SO RAN, 2004. 548 p. (In Russian).

- Programma provedeniya opytно-metodicheskikh rabot na licenziyonykh ploshchadyah AK "ALROSA" (OAO) i PAO "Severalmaz" dlya korrektyrovki sushchestvuyushchih metodov poiskov korennykh mestorozhdenij almazov v Severo-Zapadnom regione RF na 2013–2021 gg. (poyasnitel'naya zapiska) [Program of experimental and methodological works at the licensed areas of ALROSA AK (OJSC) and Severalmaz PJSC to adjust the existing methods of searching for indigenous diamond deposits in the North-West region of the Russian Federation for 2013–2021 (explanatory note)]. Arhangel'sk, 2012. (In Russian).
- Prusakova N.A., Gromtsev K.V., Laptev M.M.* Geological and geophysical prerequisites for the allocation of promising areas for exploration work on primary diamond deposits // *Ores and Metals*. 2021. No. 3. P. 22–45. (In Russian).
- Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Zuev V.M.* Kosmicheskie metody pri prognoze i poiskah mestorozhdenij almazov [Space techniques in the prediction and search for diamond deposits]. M.: Nedra-Biznescentr, 2001. 198 p. (In Russian).
- Schematic tectonic map of pre-Vendian formations Q-(35)-37. M. 1 : 2500000. VSEGEI, 2003 (In Russian).
- Ustinov V.N., Antashchuk M.G., Zagayny A.K., Kukuy I.M., Lobkova L.P., Mikoiev I.I., Antonov S.A.* Prospects for identifying diamond deposits in the north of the East European Platform // *Ores and Metals*. 2018. No. 1. P. 11–26. (In Russian).
- Folisevich M.Ya., Kirij A.N., Litovskaya M.D. i dr.* Otchet o revizionno-poiskovykh rabotah masshtaba 1 : 500000 po ocenke perspektiv korennoy almazonosnosti Leno-Anabarskogo mezhdurech'ya v 1995–1999 gg. (v 7-mi tomah) [Report on audit and search works of 1 : 500000 scale on assessment of prospects of root diamond bearing of Leno-Anabar inter-river in 1995–1999 (in 7 volumes)]. Rosgeolfond. Inv. № 476859. Amakinskaya GRE AK "ALROSA", 2000. (In Russian).
- Shpilevaya D.V.* Geological structure, mineral composition and ecological-economic aspects of development of the Arkhangel'skaya pipe (M.V. Lomonosov diamond deposit): author's abstract. diss. for the degree of candidate of geological and mineral sciences in the specialty: 25.00.11 – M.: 2008. (In Russian).