

## Картирование интрузивных массивов северной части Балыгычано-Сугойского прогиба (Магаданская область) по геофизическим данным

На основе материалов комплексной аэрогеофизической съемки (магнитометрия, гамма-спектрометрия) масштаба 1 : 50 000 представлена методика приемов обработки и интерпретации полученных данных для целей картирования интрузивных массивов на примере северной части Балыгычано-Сугойского прогиба. Уточнены контуры известных массивов, впервые выделены неосвоенные гранитоидные образования, а также серия даек и малых интрузий. По результатам объемного моделирования и классификации потенциальных полей изучено глубинное строение массивов. Разделены интрузивные образования по геофизическим данным, отражающим различные петрофизические свойства пород. Массивы классифицированы по комплексам, каждый из которых является перспективным на золото-серебряное и оловянное оруденение.

*Ключевые слова:* картирование, интрузивный массив, Балыгычано-Сугойский прогиб, аномалии геофизических полей, петрофизическое моделирование.

R. A. LEDENSKIY (VSEGEI NORILSK BRANCH)

## Mapping of intrusive massifs in the northern part of the Balygychan-Sugoi Trough (Magadan Region) based on geophysical data

The article presents methods of processing and interpreting materials of the integrated airborne geophysical survey (magnetometry, gamma-spectrometry) at a scale of 1:50,000 for mapping intrusive massifs as exemplified in the northern part of the Balygychan-Sugoi Trough. The author specified contours of known massifs, for the first time identified unexplored granitoid formations, as well as a series of dikes and minor intrusions. The presented results of modeling and classification of potential geophysical fields allowed exploring the deep structure of the massifs. Geophysical data indicating different petrophysical properties of rocks helped to divide intrusive formations. The article classified the massifs by complexes, each of which is promising for gold, silver, and tin mineralization.

*Keywords:* mapping, intrusive massif, Balygychan-Sugoi Trough, anomalies of geophysical fields, petrophysical modeling.

*Для цитирования:* Леденгский Р. А. Картирование интрузивных массивов северной части Балыгычано-Сугойского прогиба (Магаданская область) по геофизическим данным // Региональная геология и металлогения. — 2021. — № 88. — С. 84–98. DOI: 10.52349/0869-7892\_2021\_88\_84-98

**Введение.** Аэрогеофизические исследования, представляющие собой совокупность современных аппаратно-технических и научно-методических разработок, являются эффективным способом для решения широкого круга геологических задач.

Результат аэрогеофизической съемки — создание структурированного банка цифровых материалов, включающего базу данных сводных моделей физических полей, соответствующих карт и разрезов. Геофизические материалы составляют основу для уточнения и повышения качества геологической карты, способствуют решению задач как геологического картирования, так и прогноза оруденения различных типов. При этом важное значение имеет картирование интрузивных образований, с которыми пространственно и генетически могут быть связаны месторождения и проявления полезных ископаемых. Поэтому аэрогеофизические исследования находят широ-

кое применение на различных этапах геологоразведочного процесса.

В 2017 г. Норильским филиалом ВСЕГЕИ для создания геофизической основы (ГФО-200) и обеспечения геологического доизучения площадей масштаба 1:200 000 (ГДП-200) проведена комплексная аэрогеофизическая съемка масштаба 1:50 000, охватывающая листы Р-56-V, VI, расположенные в северной части Балыгычано-Сугойского прогиба (Балыгычанская площадь, Магаданская область) (рис. 1).

Центральная структура площади — Балыгычано-Сугойский орогенный прогиб Яно-Колымской складчатой системы — состоит из двух мульд: Нягаинской на севере и Омсукчанской на юге. Эта структура располагается между Сугойским синклиналием, сложенным юрскими толщами и западной краевой частью Хетагчанского поднятия. Прогиб выполнен нижнемеловыми вулканогенно-осадочными отложениями, заложен по



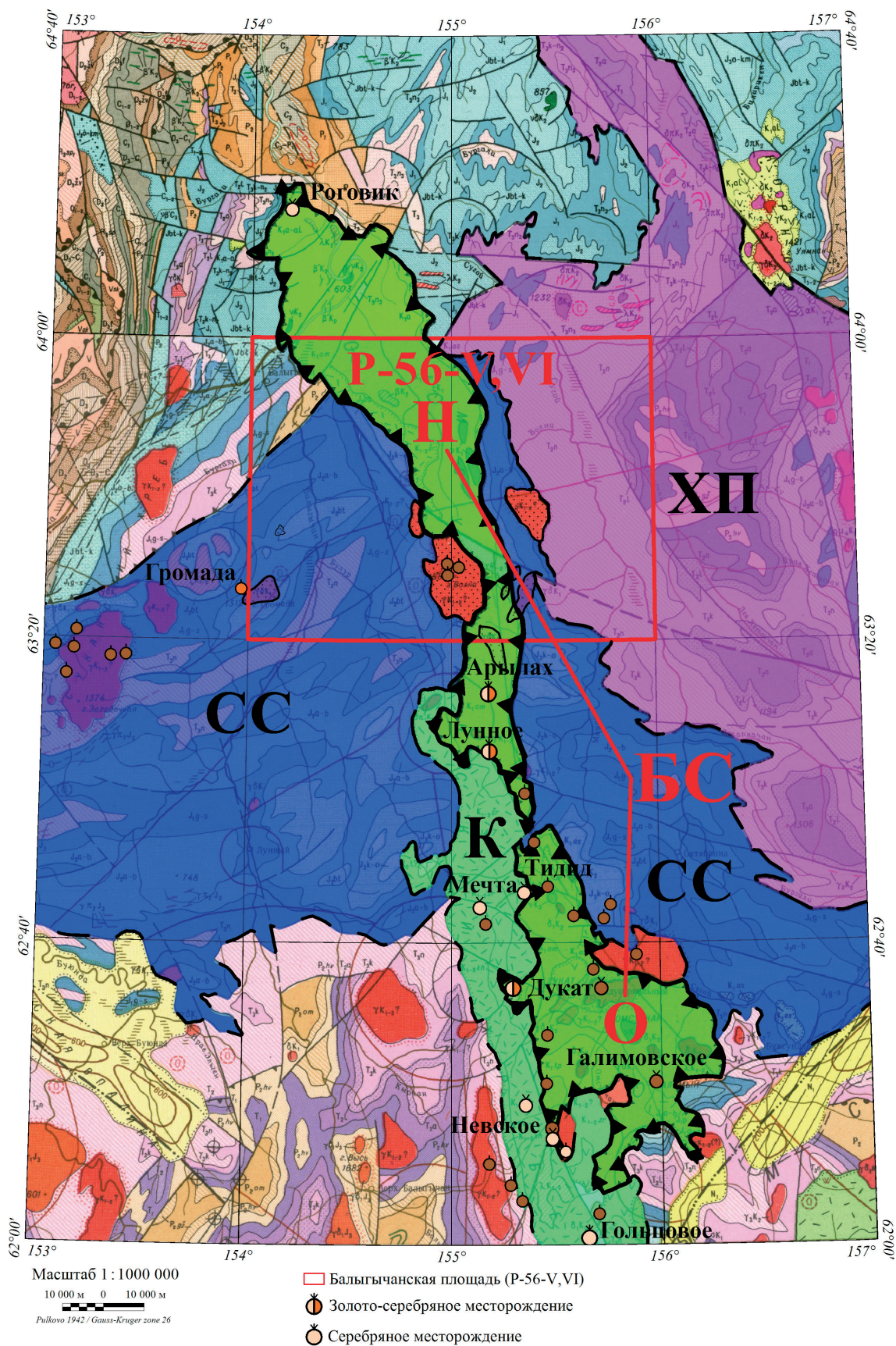


Рис. 1. Балыгчано-Сугойский прогиб в пределах ГК/1000 Q-56–57, P-56–57

Структурные элементы: BS – Балыгчано-Сугойский прогиб, Н – Нягаинская мулда, О – Омсукчанская мулда, XP – Хетагчанское поднятие, SS – Сугойский синклиорий, К – Кэнская лавовая полоса



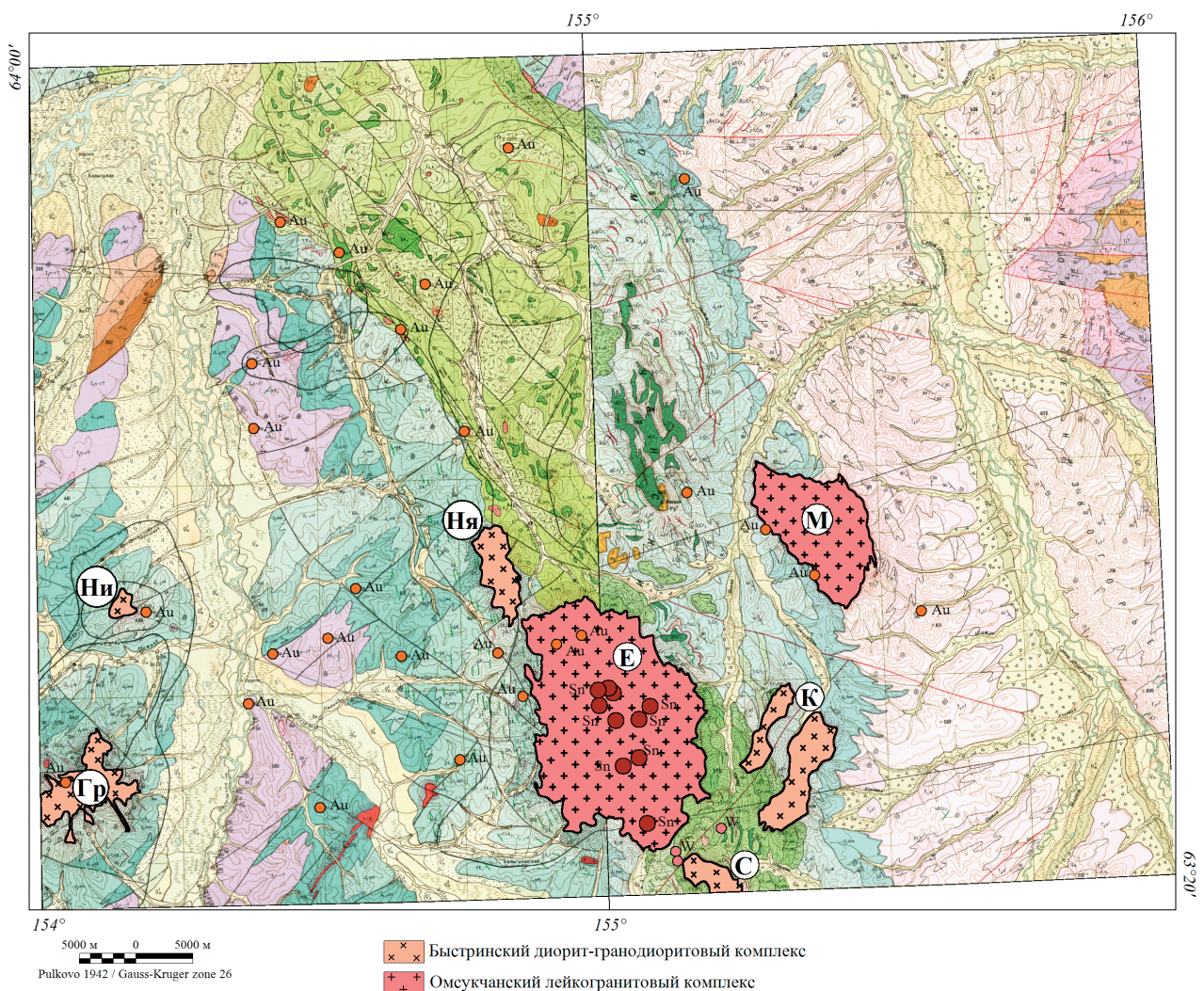
Омсукчанскому глубинному разлому фундамента складчатой системы и насыщен многочисленными гранитоидными телами. На юге прогиб тесно смыкается с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и рассматривается в качестве его ответвления. В пределах прогиба размещаются золото-серебряное (месторождения Дукат, Мечта, Тидит, Лунное, Арылах, Гольцовое), оловянное (месторождения Невское, Галимовское, Труд, Джагын) и медно-молибденовое оруденения (рис. 1) [3].

**Геологическое строение северной части Балыгычано-Сугойского прогиба** в пределах Балыгычанской площади (листы Р-56-V, VI) представлено стратифицированными осадочными и магматическими образованиями от перми до современной эпохи (рис. 2). Пермские, триасовые и юрские отложения составляют верхоянский терригенный комплекс, меловые образования сложены интрузивными породами, вулканогенными и вулканогенно-осадочными отложениями. Согласно Государственной геологической

карте масштаба 1:200 000 (ГГК-200) первого поколения, интрузивные образования площади представлены ранне-позднемеловым *быстринским* плутоническим диорит-гранодиоритовым и позднемеловым *омсукчанским* плутоническим лейкогранитовым комплексами [6; 7].

**К быстринскому комплексу** отнесены небольшие массивы Нягаинский, Кобзарь, Светлинский, Громадинский и Нижненский. В их составе преобладают гранодиориты, диориты, менее распространены габбро и граниты. В экзоконтактах и среди роговиков рассматриваемых массивов широко распространены кварцевые, сульфидно-кварцевые жилы и прожилки, содержащие повышенные концентрации золота, серебра, свинца, цинка, сурьмы, олова, мышьяка, вольфрама. К северо-восточной части Громадинского массива приурочено малое золото-серебряное месторождение Громада, расположенное на соседнем с запада листе (Р-56-IV) (рис. 1) [5].

Отметим, что Светлинский массив имеет продолжение на сопредельном с юга листе (Р-56-XII)



**Рис. 2. Балыгычано-Сугойский прогиб в пределах ГГК-200/1 Р-56-V, VI**

Обозначения интрузивных массивов: Ни – Нижненский, Ня – Нягаинский, М – Марат, Гр – Громадинский, Е – Егорлыкский, К – Кобзарь, С – Светлинский

и, согласно ГГК-200 второго поколения, относится к *наяханскому* габбро-лейкогранитовому комплексу. С гранитоидами этого комплекса связаны жилы с золото-серебряной, золото-кобальтовой и молибденовой минерализацией. Одним из ярких примеров таких гранитоидов является Арылахский интрузив *наяханского* комплекса, находящийся в 15 км южнее Балыгычанской площади в пределах Арылахского золото-серебродородного узла. В восточной части этого интрузива, в его экзоконтактовой зоне, закартированы сереброносные кварцевые и кварц-сульфидные жилы золото-серебряного месторождения Арылах (рис. 1) [8].

**Омсулчанский комплекс** распространен преимущественно в пределах Балыгычано-Сугойского прогиба и его обрамления, где объединяет массивы Егорлыкский и Марат. В пределах Егорлыкского массива широко распространены кварц-турмалиновые, касситерит-турмалин-кварцевые, хлорит-кварцевые жилы, содержащие оловянное оруденение. Представленные на площади коренные и россыпные малые промышленные месторождения олова обнаруживают тесную пространственную и, вероятно, парагенетическую связь с массивом (рис. 2) [6; 7].

В целом Балыгычанская площадь, согласно минерагеническому районированию ГГК-1000/3,

включена в Балыгычано-Сугойскую (Ag, Au, Sn) и Сеймчанскую (Sn, Au, Ag, Co) минерагенические зоны и характеризуется наличием месторождений олова, рудопроявлений золота и серебра, которые приурочены к экзоконтактовым и апикальным частям интрузивных массивов различных комплексов. Поэтому можно предположить, что интрузивы в зависимости от принадлежности к тому или иному комплексу могут быть рудовмещающими для соответствующего типа рудной минерализации, например *быстринский* и *наяханский* – к золото-серебряной, а *омсулчанский* – к оловянной [3].

**Аэрогеофизическая (аэромагнитная, аэрогамма-спектрометрическая) съемка** на Балыгычанской площади выполнена на вертолете Eurocopter AS350 с применением комплекса, включающего аэромагнитометр с квантовым цезиевым датчиком и частотой регистрации 100 Гц; аэрогамма-спектрометр объемом детектора 32 л; систему спутниковой навигации. Аэросъемка проведена с детальным огибанием рельефа при средней скорости 170 км/час и средней высоте полета 50 м. Обработка геофизического материала выполнена с применением программного обеспечения Oasis montaj (Geosoft). С целью локализации приповерхностных геологических объектов выполнены

Таблица 1

## Характеристика массивов Балыгычанской площади по геофизическим данным

Интрузивные массивы	Геофизические характеристики		
	Гравитационное поле	Аномальное магнитное поле	Радиогеохимические поля
Громадинский, Нижненский (K <sub>1</sub> ; граниты, гранодиориты, гранодиорит-порфиры)	Площадные отрицательные аномалии –10...–15 мГал. Площадные отрицательные аномалии локальной составляющей 0...–3 мГал	Площадные слабоинтенсивные отрицательные аномалии 0...–300 нТл. Высокоинтенсивные положительные аномалии контактового ореола до 500 нТл. Знакопеременные аномалии локальной составляющей –200...100 нТл	Повышенные значения гамма-поля (ТС 15–26 мкР/ч, Th 10–20 г/т, К 2–5 %, U 2–6 г/т)
Егорлыкский, Марат (K <sub>2</sub> ; лейкограниты, граниты)	Площадные отрицательные аномалии –10...–30 мГал. Площадные отрицательные аномалии локальной составляющей 0...–4 мГал. В обрамлении аномалии с наибольшими значениями локальной составляющей 1,5–2 мГал	Площадные слабоинтенсивные отрицательные аномалии 0...–150 нТл. Егорлыкский массив – высокоинтенсивные отрицательные аномалии контактового ореола до –400 нТл. Марат – положительные аномалии контактового ореола до 400 нТл. Знакопеременные аномалии локальной составляющей –100...100 нТл	Высокие значения гамма-поля (ТС 20–42 мкР/ч, Th 15–40 г/т, К 4–6 %, U 4 г/т)
Нягаинский; Кобзарь; Светлинский (K <sub>2</sub> ; граниты, гранодиориты)	Отрицательные аномалии –5...–15 мГал. Положительные аномалии локальной составляющей 0–2 мГал	Площадные высокоинтенсивные положительные аномалии 50–1400 нТл. Высокоинтенсивные положительные аномалии контактового ореола до 800 нТл. Знакопеременные аномалии локальной составляющей 700...–200 нТл к периферии	Средние значения гамма-поля (ТС 10–20 мкР/ч, Th 8–14 г/т, К 2–4 %, U 2–4 г/т)
Надінтрузивная зона массивов Гурзуф, Нарзан (?; диоритовые порфиры, кварцевые диориты)	Аномалии локальной составляющей от 1 в центре до –0,5 мГал к периферии	Площадные высокоинтенсивные положительные аномалии 100–1000 нТл. Знакопеременные аномалии локальной составляющей 800...–100 нТл к периферии	Средние значения гамма-поля (ТС 10–14 мкР/ч, Th 7–9 г/т, К 2–3 %, U 2–3 г/т)



расчеты локальной составляющей аномального магнитного и гравитационного полей. С целью расчета локальной составляющей применен фильтр Гаусса с длиной волны 5000 м для магнитного и 16000 м – гравитационного полей. Эти волновые числа соответствуют переходу от отображения глубинных источников к приповерхностным. Кроме того, для уточнения контактов и контуров интрузивных массивов использовались различные трансформанты магнитного поля.

Комплексная интерпретация полученных геофизических полей и их трансформант позволила достаточно уверенно картировать магматические породы с выделением нескрытых образований и уточнением контуров известных интрузивов (табл. 1, рис. 3). Так, например, в гравитационном поле площадными отрицательными аномалиями отчетливо выделяются массивы Егорлыкский, Марат (*омсукчанский* комплекс) и Громадинский, Нижненский (*быстринский* комплекс) (рис. 3, А).

В магнитном поле плутонам Егорлыкский и Марат свойственны площадные слабоинтен-

сивные отрицательные аномалии в обрамлении высокоинтенсивных магнитных аномалий экзо-контактовых изменений (рис. 3, Б, Г).

Громадинский и Нижненский массивы маркируются областями слабоинтенсивного отрицательного магнитного поля в обрамлении высокоинтенсивных положительных магнитных аномалий, совпадающих с зоной ороговикования. Эти зоны отстоят от границ массивов на 500–1000 м шириной до 3 км (рис. 3, Б, Г).

Сопряженная с небольшим выходом гранодиорит-порфиров Нижненского штока локальная отрицательная аномалия силы тяжести вытянута в широтном направлении и простирается к востоку за пределы массива. В восточной части контура этой гравиметрической аномалии и в магнитном поле выделяется аналогичная структура, которая интерпретируется как апофиз общего интрузивного тела. Восточный шток перекрыт терригенными мезозойскими отложениями и четвертичными образованиями р. Балыгычан, мощность которых оценивается в первые десятки метров [6].

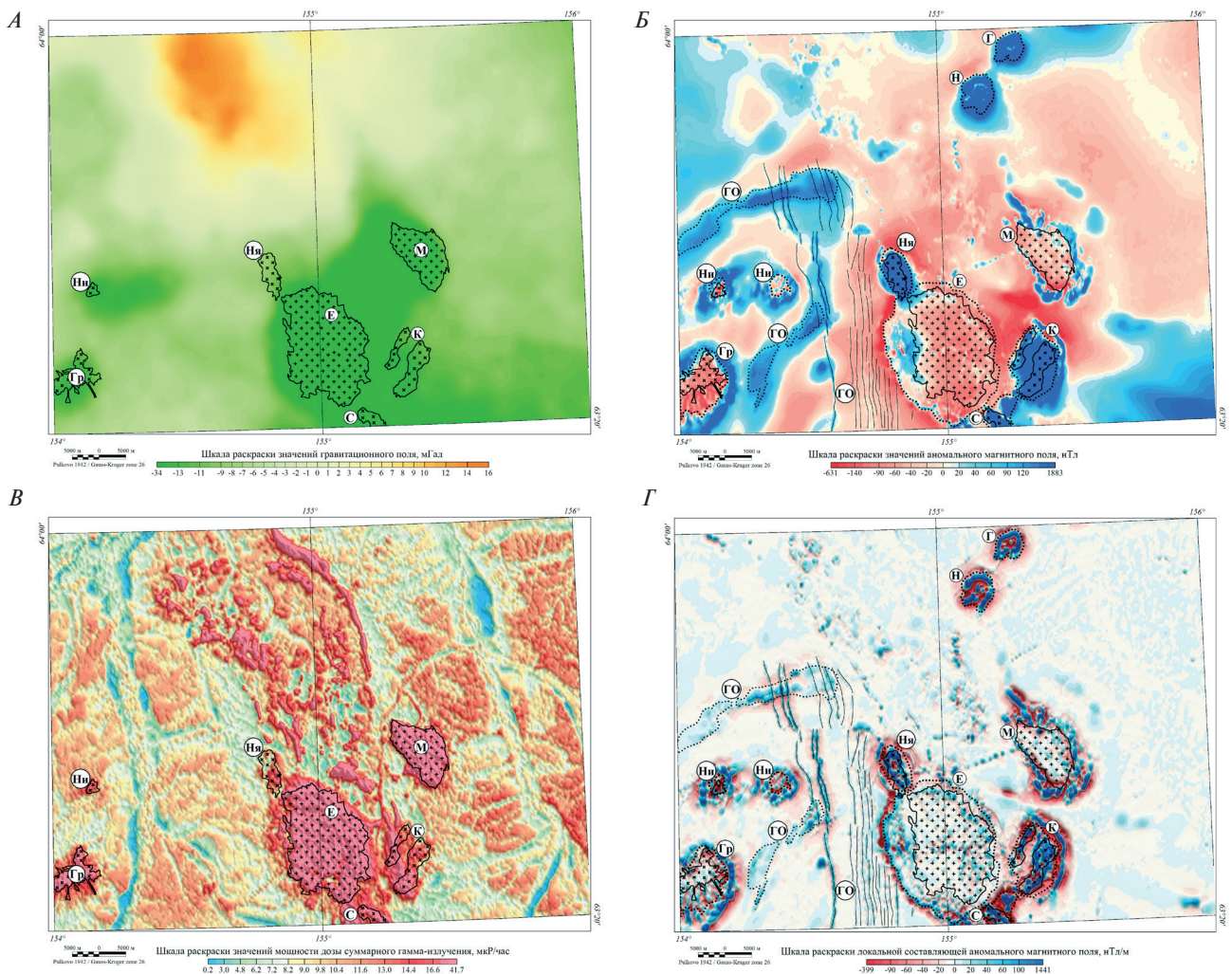


Рис. 3. Геофизические поля Балыгычанской площади

Карта поля силы тяжести (А), аномального магнитного поля (Б), мощности дозы суммарного гамма-излучения (В), локальной составляющей магнитного поля (Г). Пунктиром выделены уточненные границы интрузивных и гипабиссальных образований. Обозначения интрузивных образований: Г – Гурзуф, Н – Нарзан, ГО – гипабиссальные образования основного-среднего составов. Ост. обозн. интрузивных образований см. на рис. 2

Размеры Громадинского и Нижненского массивов, картируемые под перекрывающими отложениями, только по геофизическим данным, расширены в 2,5 раза – с 36 до 93 км<sup>2</sup> (рис. 3, Б, Г).

По ярко выраженным площадным высокоинтенсивным положительным аномалиям магнитного поля до 1400 нТл выделяются интрузивные массивы Нягаинский, Кобзарь и Светлинский (рис. 3, Б). Массивы обрамляются контрастными субкольцевыми положительными магнитными аномалиями контактовых роговиков (рис. 3, Г), которые могут иметь рудоконтролирующую роль для золото-серебряного оруденения [13; 20].

Методика проведения съемки и высокая разрешающая способность аэромагнитометра позволили впервые выделить в западной части площади по многочисленным линейным сближенным локальным положительным магнитным аномалиям субвертикальные дайки предположительно основного состава мощностью до 100 м. Эти гипабиссальные тела, совпадая с простираем Балыгычано-Сугойского прогиба, занимают секущее положение по отношению к общей структуре мезозойских отложений и, по-видимому, внедрялись в оперяющие трещинные зоны Омсукчанского разлома (рис. 3, Г). К западу от даек, субсогласно складчатости, прослежены гипабиссальные образования. Изучаемые малые интрузии, вероятно, среднего состава характеризуются протяженными областями положительного слабодифференцированного магнитного поля (рис. 3, Б). Положение магнитных аномалий позволило впервые выделить малые интрузивные тела основного-среднего состава.

По материалам гамма-спектрометрии, средними значениями радиоактивности обладают массивы Нягаинский, Кобзарь и Светлинский. Массивы Громадинский и Нижненский характеризуются повышенным уровнем радиоактивности. Наиболее контрастно в гамма-спектрометрических полях выделяются массивы Егорлыкский и Марат – высокими значениями до 42 мкР/ч (рис. 3, В).

На основании представленных геологических и геофизических характеристик пород (табл. 1), весьма вероятно, что массивы Нягаинский, Кобзарь и Светлинский могут быть отнесены к *наяханскому* габбро-лейкогранитовому комплексу [6–8].

Подобно высокомагнитным массивам *наяханского* комплекса, в северной части Балыгычанской площади выделяются две похожие высокоинтенсивные концентрически-зональные магнитные аномалии до 1000 нТл (рис. 3, Б, Г). Они интерпретируются как зоны надинтрузивных изменений (контактовые роговики) нескрытых флангов интрузивных массивов – Гурзуф и Нарзан. Массивы сопряжены с локальными положительными аномалиями силы тяжести (табл. 1).

На ГГК-200 первого поколения в пределах указанных аномалий локализуются выходы позднемеловых малых интрузий и даек среднего состава. В пределах северо-восточной магнитной

аномалии расположены дайки кварцевых диоритов, диоритовых порфиритов и гранодиорит-порфиров, служащие индикатором интрузивного процесса [7]. По всей видимости, повышенные значения магнитного поля свидетельствуют о наличии диоритового интрузива Гурзуф на глубине около 100 м по результатам моделирования (программный модуль *PotenQ*, *Geosoft*).

Согласно геологической карте, в пределах юго-западной магнитной аномалии диоритовые порфириты слагают дайки, а кварцевые диориты – два небольших штока [7]. Штоки характеризуются значительными контактовыми изменениями (ороговикование, окварцевание, биотит, хлоритизация) и представляют собой, по-видимому, апикальные выступы более крупного интрузива Нарзан, залегающего на глубине до 50 м. В экзоконтакте северо-восточного штока располагается жильное рудопроявление золота до 0,8 г/т.

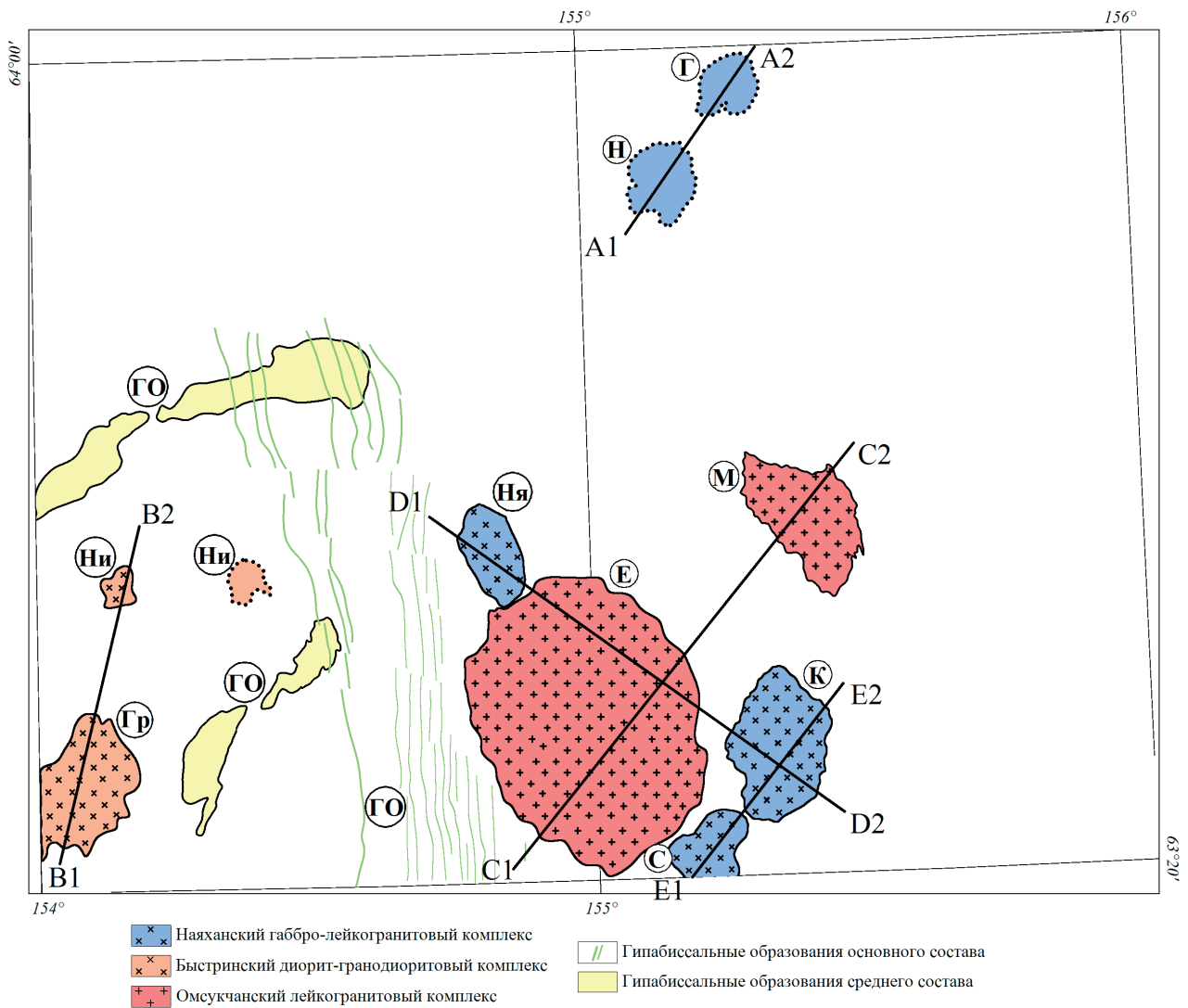
За пределами листа, на северо-восточном продолжении по линии этих массивов, в контуре локальной положительной гравиметрической аномалии и в непосредственной близости от границы листа выделяются аналогичные массивы Рок и Флагман, относящиеся к *наяханскому* комплексу (Q-56 ГГК-1000/3). При составлении ГГК-1000 третьего поколения листа Q-56 возраст массива Флагман, прорывающий верхнетриасовые отложения, определен как позднемеловой:  $86,6 \pm 1,1$  и  $84 \pm 2$  млн лет. Массивы характеризуются аномалиями магнитного поля, схожими по форме и амплитуде с магнитными аномалиями, маркирующими как интрузивы Гурзуф и Нарзан, так и Нягаинский, Кобзарь и Светлинский [4; 9]. Это дает основание предположительно отнести интрузивы Гурзуф и Нарзан к *наяханскому* комплексу.

Таким образом, материалы магнитного и гамма-спектрометрического методов позволили уточнить контуры известных интрузивных массивов, площадь нескрытой части которых, по данным геологической карты первого поколения, увеличена почти на 30 % от выхода на дневную поверхность. Выдвинуты предположения о возможной принадлежности интрузивов к разным комплексам, правомерность которых необходимо подтвердить (рис. 4).

**Для характеристики глубинного строения интрузивных массивов Балыгычанской площади выполнено объемное моделирование магнитного и гравитационного полей по разрезам, заложенным через все интрузивные массивы площади (рис. 4).**

Петрофизическое моделирование выполнено по методике Норильского филиала ВСЕГЕИ с помощью послойного разделения гравитационного и магнитного полей на основе анализа величины и направления векторов их горизонтальных градиентов. При этом методически обоснованным является приведение магнитного поля к функциональному виду гравитационного поля путем его пересчета в магнитный потенциал,





**Рис. 4. Уточненные контуры магматических образований Балыгычанской площади с линиями разрезов петрофизического моделирования**

Усл. обозн. см. на рис. 3

что позволяет для трансформации обоих полей использовать одинаковые частотные интервалы. Вычисленные значения горизонтальных градиентов для гравитационного поля и магнитного потенциала раскладывались на серию разночастотных составляющих. Из каждой составляющей методом интегрирования по горизонтальным осям вычислялись значения поля. После выполнения этой процедуры был получен набор остаточных полей, отражающих изменения эффективных магнитных и гравитационных параметров аномалообразующих объектов в горизонтальных слоях постоянной мощности на различных интервалах глубин. Структура поля каждой составляющей позволяет смоделировать положение магнитных и плотностных контактных поверхностей, отождествляемых с границами геологических объектов. Построение контактных поверхностей произведено путем вычисления пространственных координат сингулярных источников с помощью деконволюции Эйлера – алгоритма, позволяюще-

го вычислять координаты и глубину положения особой точки поля через значения частных производных по координатным осям. Анализ расположения особых точек потенциальных полей позволил распределить магнитно-плотностные неоднородности в слоях переменной мощности и глубины залегания, а также оценить нижнюю границу их распространения [11].

В результате был образован трехмерный массив данных, позволивший получить представление о распределении плотностных и магнитных неоднородностей в нижнем полупространстве и провести петромагнитное моделирование по заданным линиям разрезов. Латеральные и вертикальные вариации магнитных и плотностных свойств среды можно отождествлять со структурными и вещественными изменениями глубинного геологического строения изучаемой территории (рис. 5, 6).

Дальнейшее преобразование разрезов заключалось в классифицировании магнитно-плотностных

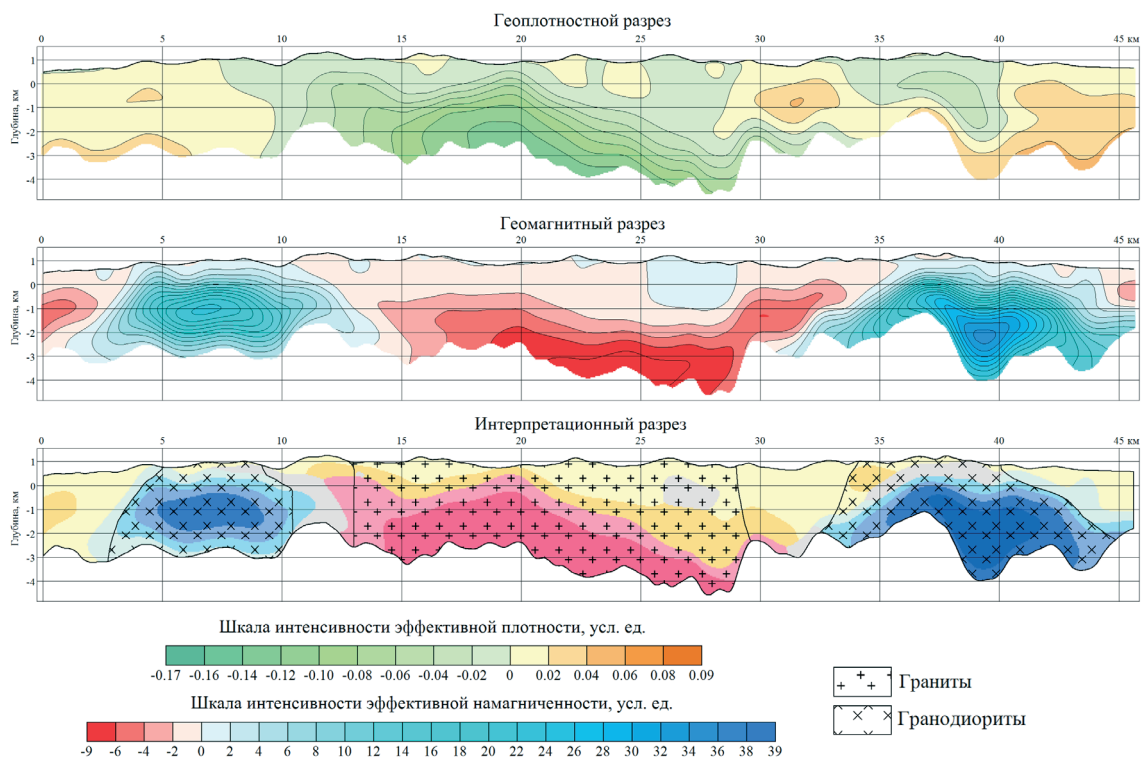


Рис. 5. Петрофизический разрез по линии D1–D2 (положение указано на рис. 4)

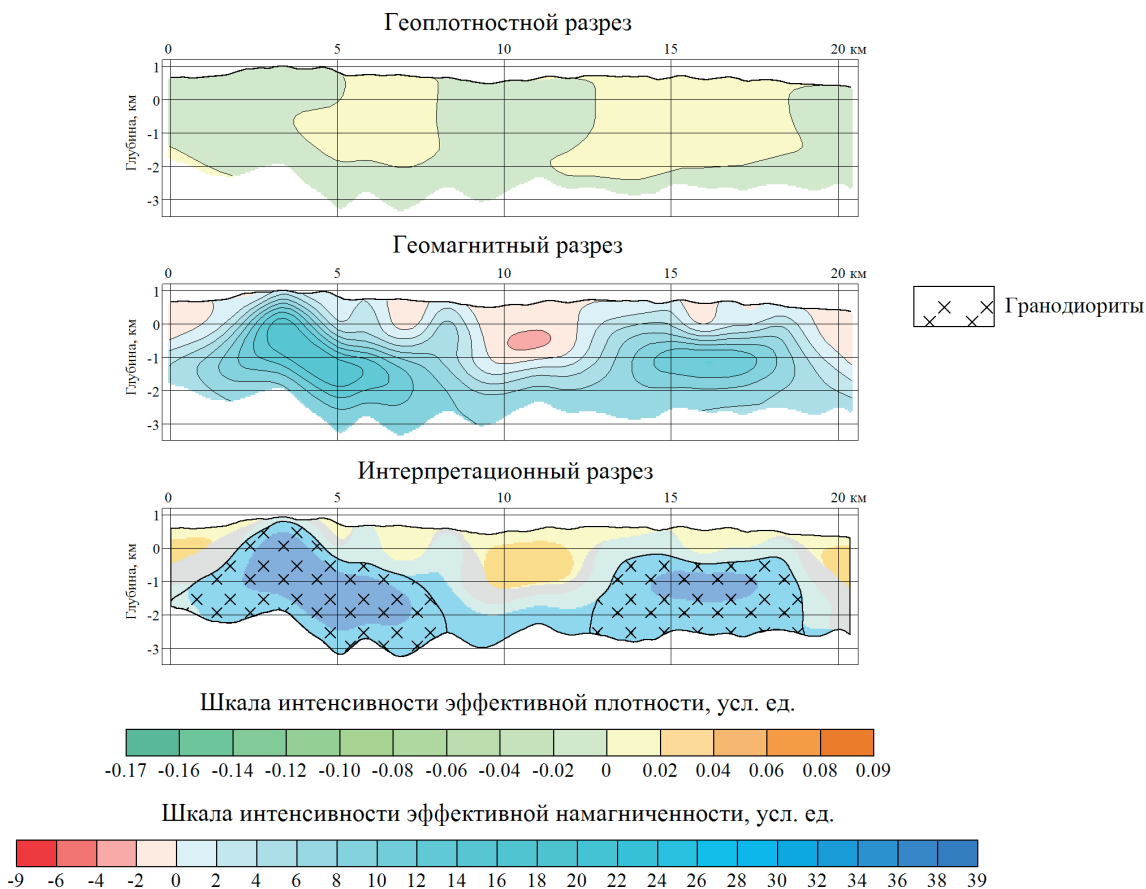
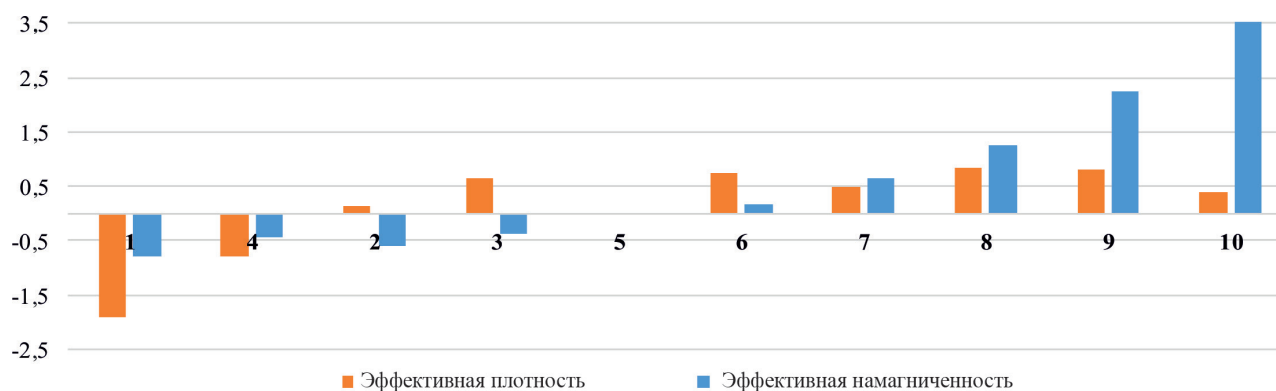


Рис. 6. Петрофизический разрез по линии A1–A2 (положение указано на рис. 4)



Распределение эффективных плотности и намагниченности по классам

Номер класса	Количество точек	Эффективная плотность		Эффективная намагниченность		Геологическая характеристика
		среднее	стандартное отклонение	среднее	стандартное отклонение	
1	36511	-0,0990	0,0213	-3,876	3,314	Гранитоиды, K <sub>1-2</sub>
4	29832	-0,0501	0,0133	-1,208	2,437	Контактово-измененные породы (зоны контактового ороговикования)
2	32279	-0,0110	0,0105	-2,290	2,315	Осадочные породы, J, T
3	67892	0,0112	0,0181	-0,582	1,300	Вулканогенно-осадочные породы, K <sub>1-2</sub> ; терригенные отложения (KZ)
5	346808	-0,0166	0,0022	2,292	0,340	Фоновые значения; внешние части контактово-ороговикованных пород
6	13737	0,0159	0,0192	3,570	1,248	Контактово-измененные породы (зоны контактового ороговикования)
7	18172	0,0044	0,0160	7,585	1,280	Гранодиорит-порфиры, кварцевые диоритовые порфириты, K <sub>2</sub>
8	17963	0,0193	0,0225	12,211	1,812	Гранодиориты, K <sub>2</sub>
9	10364	0,0179	0,0186	20,047	2,495	Кварцевые диориты, K <sub>2</sub>
10	7582	0,0010	0,0189	30,330	3,763	Диориты, K <sub>2</sub>



неоднородностей и определении наиболее вероятной геологической характеристики выделяемых объектов. Классификация проведена с применением комплекса спектрально-корреляционного анализа «КОСКАД 3D» методом динамических сгущений (K-средних) на базе двух признаков — эффективных намагниченности и плотности [14; 15].

В результате классификации получены 10 классов, отражающих распределение зон, характеризующихся различными петрофизическими свойствами (табл. 2). Сопоставление результатов классификации с геологической информацией позволяет идентифицировать отдельные классы (или группы классов) с конкретными геологическими образованиями. Раскраска интерпретационных разрезов на рис. 5 и 6 соответствует цветам в табл. 2.

Класс 1 характеризуется аномально низкими магнито-плотностными свойствами и маркирует гранитоиды Егорлыкский и Марат (*омсукчан-*

*ский* комплекс), Громадинский и Нижненский (*быстринский* комплекс). Классы 4 и 5 обладают низкими значениями плотностных и средней величиной магнитных свойств и отождествляются с зонами контактово-измененных пород, связанными с массивами как *омсукчанского*, так и *быстринского* комплексов (рис. 5).

Классы 7–10 отличаются аномально высокими магнито-плотностными свойствами и интерпретируются как гранодиориты массивов Нягаинский, Кобзарь и Светлинский (*наяханский* комплекс), так и нескрытые гранодиориты интрузивов Гурзуф и Нарзан (рис. 5, 6).

Класс 6 имеет высокие значения плотностных и низкие — магнитных свойств и сопоставляется с зонами контактово-измененных пород, связанными с массивами 7–10 классов *наяханского* комплекса.

Классы 2 и 3 отмечаются повышенными плотностными признаками и низкими величинами магнитных свойств. Они отвечают полям распро-

странения мезозойских осадочных и карбонатных пород, меловых и современных терригенных отложений.

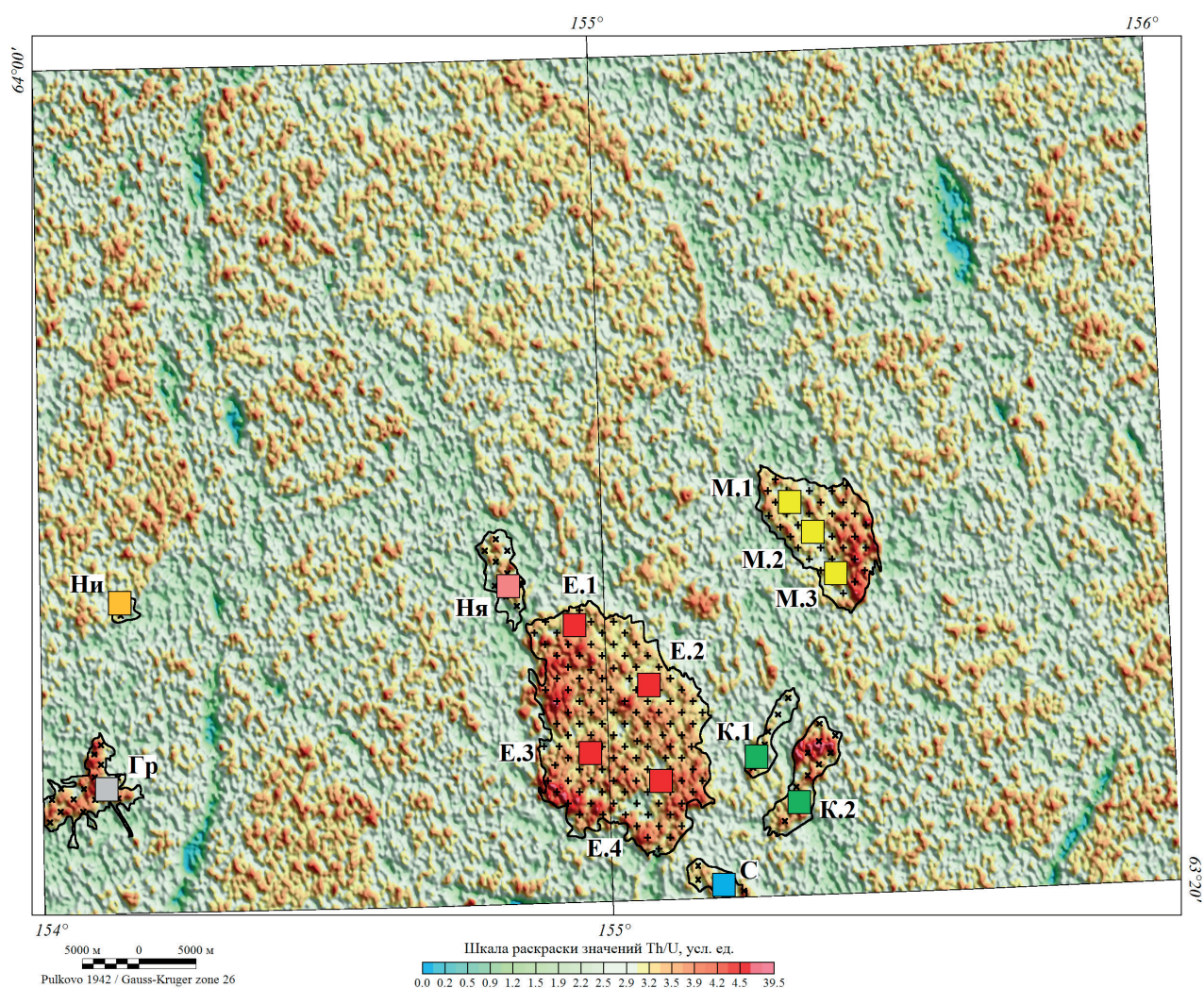
Петрофизические разрезы по другим линиям также соответствуют предложенной методике разделения интрузивных массивов. Так, в рамках одних классов находятся интрузивные массивы *быстринского* и *омсукчанского* комплексов. Другая группа классов представлена гранодиоритовыми массивами Нягаинский, Кобзарь, Светлинский, Гурзуф, Нарзан, предположительно представляющие один *наяханский* комплекс.

Исходя из этого можно заключить, что представленная методика петрофизического моделирования и классификации потенциальных полей позволила изучить глубинное строение интрузивных массивов и разделить их по комплексам.

**Для дальнейшего изучения и дополнительно разделения** гранитоидных образований проведен статистический анализ радиогеохимических полей гранитоидных интрузий. При анализе использовано положение о сохранении торий-

уранового отношения в пределах интрузивов одного комплекса, независимо от петрографических разновидностей слагающих его пород. Отношение тория к урану является хорошим показателем условий образования породы. Основная масса урана и тория накапливается к концу магматического процесса в остаточном расплаве, что значительно увеличивает радиоактивность пород от ранних дифференциатов к поздним. Независимо от содержания тория и урана в системе гранодиорит – лейкогранит, величина их отношения постоянна и укладывается в пределах единой линейной зависимости [1; 18; 21].

Значения радиоактивных элементов были взяты по медианам содержаний урана и тория на участках выборки в пределах границ всех интрузивных массивов (рис. 7). Участки выборки представляют собой квадраты площадью 4 км<sup>2</sup>, что соответствует 420-ти точкам. По каждому интрузивному массиву выбирался участок или несколько участков в областях спокойного неизрезанного гамма-поля и равномерного распределения содержаний урана и тория.



**Рис. 7.** Карта торий-уранового отношения Балыгчанской площади с расположением участков для статистического анализа

Усл. обозн. см. на рис. 2; М.1 – номера участков выборки



Наименьшие значения торий-уранового отношения (2.9) характерны для частично вскрытого гранодиоритового массива Нижненский; средние (около 3.3) относятся к гранодиоритовым массивам Нягаинский, Кобзарь, Светлинский и гранитным – Егорлыкский и Марат; максимальное

с ториевой доминантой (3.9) у Громадинского массива преимущественно гранодиоритового состава с центральной гранитной частью (табл. 3).

На рис. 8 представлена диаграмма распределения интрузивов по торий-урановому отношению, демонстрирующая их разделение на две группы, вероятно в зависимости от состава и основности пород. Первая группа имеет неупорядоченное распределение низких содержаний тория и урана и характеризуется средним гранодиоритовым составом. К этой группе относятся массивы Нягаинский, Нижненский, Кобзарь, Громадинский и Светлинский двух комплексов (*быстринский* и *наяханский*). Вторая группа обладает устойчивой линейной связью тория и урана и повышенными значениями их содержаний. Группа отражает только два интрузива Егорлыкский и Марат кислого гранитного состава, что подтверждает их принадлежность к одному *омсукчанскому* комплексу.

Равномерное увеличение содержаний элементов (накопление урана и тория) этих интрузивов может сообщать о неоднородности строения массивов, то есть как о нескольких фазах внедрения магматического расплава (интрузивной и жильной), так и нескольких фациях собственно интрузивной фазы (главной интрузивной и эндо-контактной) [10]. Участок Е.3 располагается в центральной части интрузива Егорлыкский, а участки Е.4, Е.1 и Е.2 с более повышенными содержаниями тория и урана находятся в периферических частях массива, представляющих собой

Таблица 3

**Торий-урановое отношение интрузивных массивов**

Интрузив	Номер участка выборки	Th/U	Медиана содержаний	
			U, г/т	Th, г/т
Нижненский	Ни	2,99	3,41	10,18
Марат	М.1	3,17	5,54	17,54
	М.2	3,05	6,34	19,33
	М.3	3,10	5,98	18,54
Светлинский	С	3,25	4,17	13,55
Егорлыкский	Е.1	3,24	6,03	19,57
	Е.2	3,20	6,95	22,23
	Е.3	3,49	4,95	17,26
	Е.4	3,41	5,47	18,66
Нягаинский	Ня	3,39	2,99	10,14
Кобзарь	К.1	3,21	3,89	12,48
	К.2	3,63	3,98	14,47
Громадинский	Гр	3,97	3,95	15,65

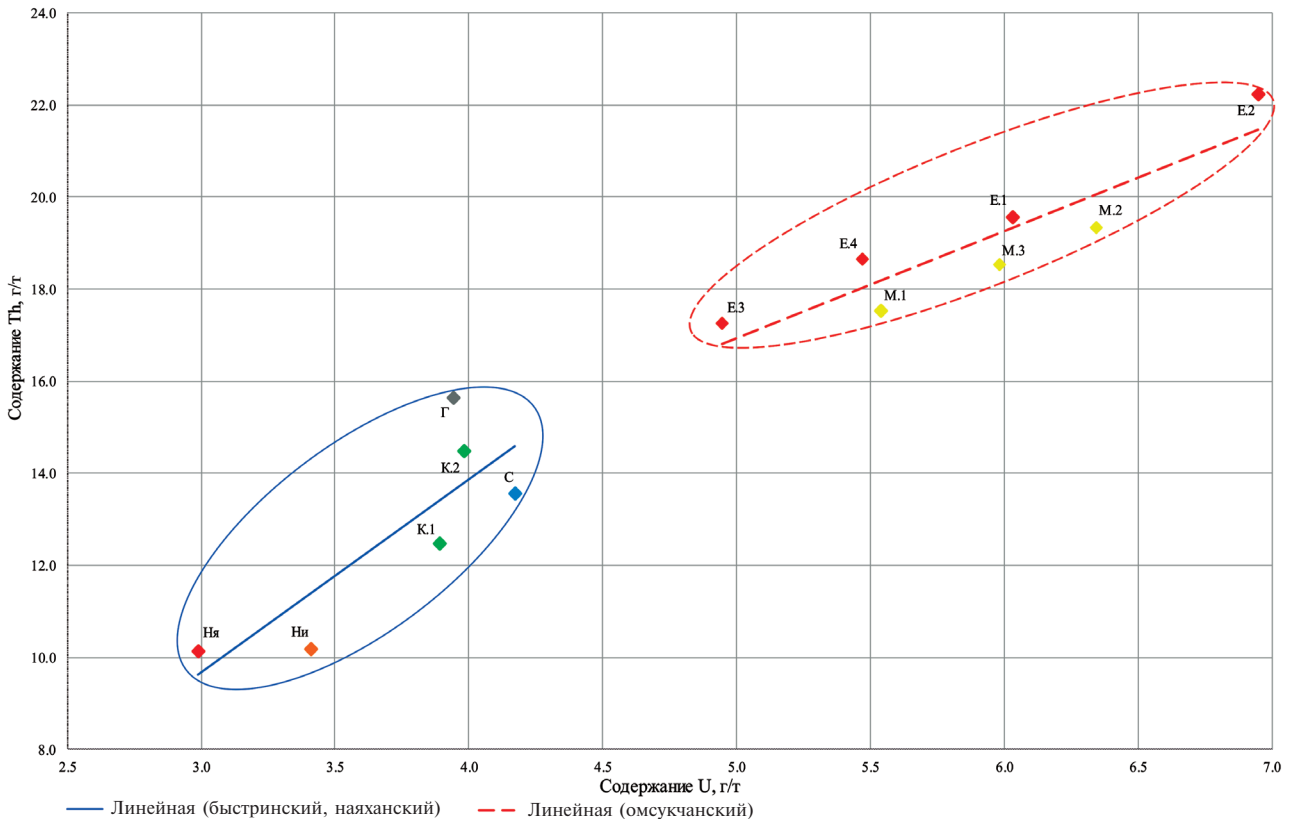


Рис. 8. Торий-урановое отношение интрузивов Балыгчанской площади

краевую мелкозернистую фацию гранитов-аляскитов с дайками аплитов. Согласно ГГК-200, в центральной части массива Марат (участок М.2 с более повышенными содержаниями тория и урана) отмечены пересечения среднезернистых гранитов мелкозернистыми. Различными авторами эти мелкозернистые граниты считаются либо продуктами второй фазы внедрения магмы, либо эндоконтактной фацией аплитовых гранитов [7].

Для уточнения радиогеохимической специализации интрузивов выполнено вычисление надфоновых содержаний естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) на основе оценки вклада каждого элемента в общую гамма-активность горных пород [22]. Для каждого естественного радиоактивного элемента с использованием соответствующего гамма-эквивалента определялось его надфоновое содержание. Полученные величины, центрированные и нормированные, объективно отображают радиогеохимическую специализацию геологических образований, независимо от ландшафтных условий. Сопоставление надфоновых содержаний ЕРЭ реализовано путем качественной классификации территории по уровню избытка или дефицита одного из трех элементов и позволяет определить радиогеохимическую специализацию горных пород (рис. 9) [12].

Практически все интрузивы, расположенные на Балыгычанской площади: Громадинский, Нижненский, Марат, Нягаинский, Кобзарь, Светлинский – характеризуются преимущественно торий-калиевой, калиевой и в меньшей степени уран-калиевой радиогеохимическими специализациями пород, вероятно связанными с мощны-

ми зонами калиевого метасоматоза. Центральная часть Егорлыкского интрузива также имеет преимущественно калиевую и торий-калиевую доминанты, свойственные центральным частям тел кислых лейкократовых гранитов. Краевые же части массива обладают ториевой и уран-ториевой специализациями пород, связанными с предпочтительным обогащением ураном и торием эндоконтактных частей интрузивов кислого состава от ранних к поздним фазам внедрения [2; 19]. При дальнейшем постмагматическом кислотном метасоматозе содержание урана увеличивается в грейзенизированных гранитах и грейзенах, а торий выносится, обогащая зоны поздней альбитизации и калишпатизации [10]. На интрузивные зоны нескрытых частей интрузивов (контактные роговики) имеют калиевую и уран-калиевую радиогеохимические специализации пород, которые могут указывать на определенные перспективы рудоносности [20; 21].

Таким образом, методический прием расчета надфоновых содержаний ЕРЭ позволил установить для интрузивных массивов северной части Балыгычано-Сугойского прогиба калиевую, калий-ториевую, уран-калиевую и в меньшей степени ториевую радиогеохимическую специализацию пород.

В результате анализа геофизических материалов наиболее контрастно интрузивные образования Балыгычанской площади выделяются по таким параметрам, как логарифм полного градиента аномального магнитного поля и мощность дозы суммарного гамма-излучения. Значения брались по сети 100 × 100 м с интерполированных

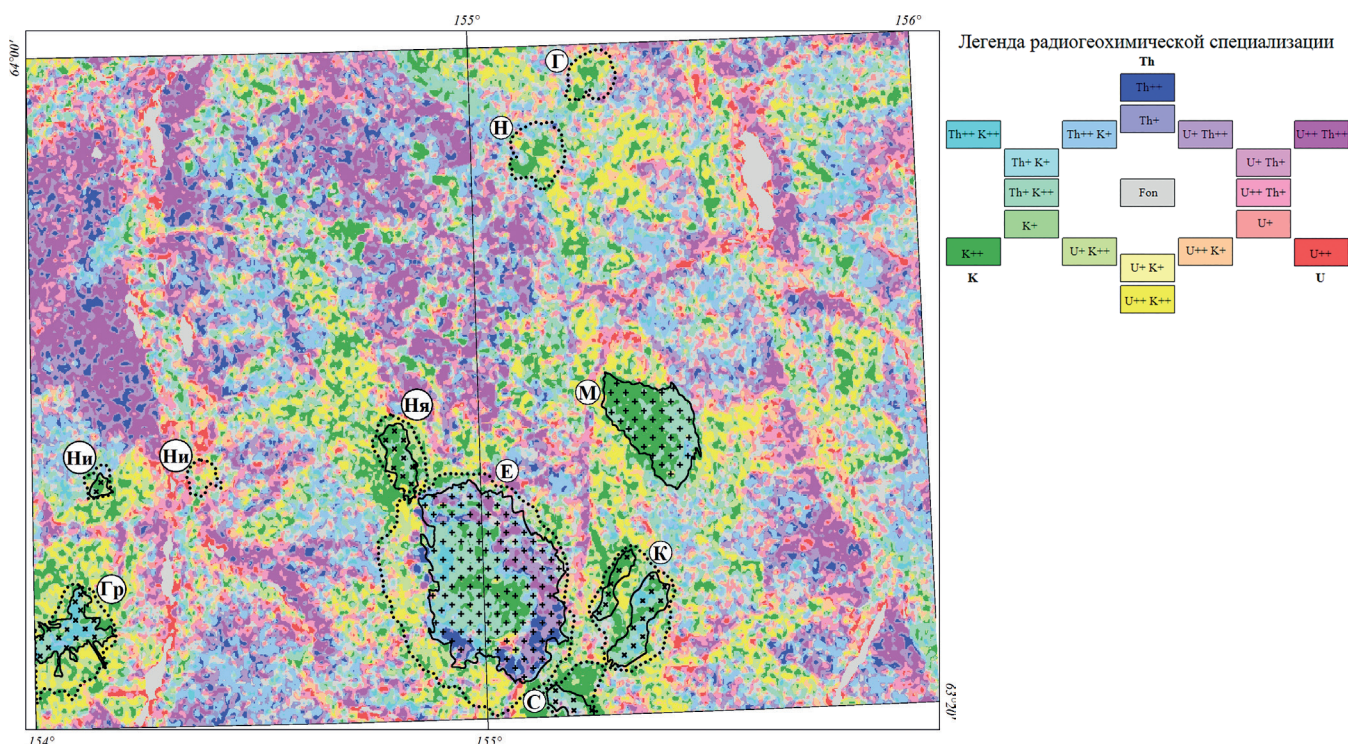


Рис. 9. Сводная радиогеохимическая карта

Усл. обозн. см. на рис. 3 и 2



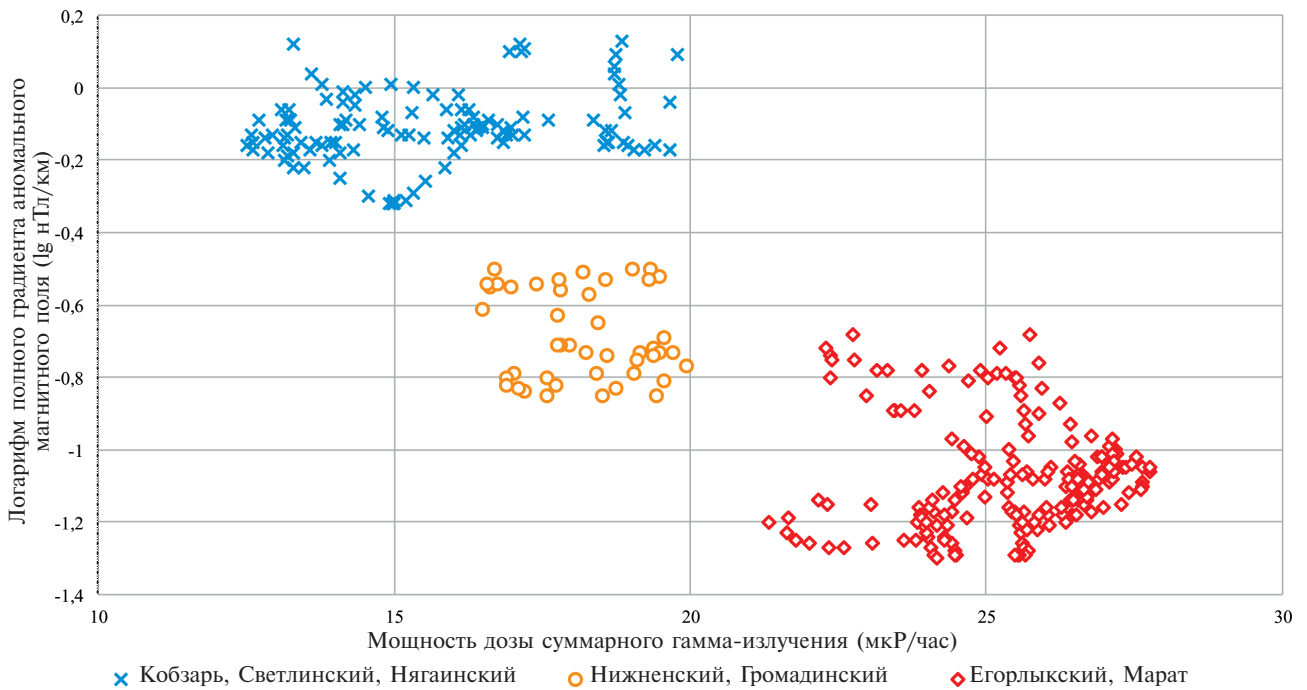


Рис. 10. Диаграмма соотношений геофизических параметров интрузивов Балыгычанской площади

матриц с размером ячейки в 100 м. Соотношения данных параметров позволили уверенно разделить интрузивы по комплексам (рис. 10).

Массивы Егорлыкский и Марат (омсукчанский комплекс) кислого состава отмечаются минимальными значениями логарифма полного градиента магнитного поля (–1 нТл/км) и наиболее повышенными значениями гамма-поля (25 мкР/ч), а интрузивы Нижненский и Громадинский (быстринский комплекс) среднего состава – средними значениями логарифма полного градиента магнитного поля (–0,6 нТл/км) и

повышенными – гамма-поля (18 мкР/ч). Обособленно располагаются массивы Нягаинский, Кобзарь и Светлинский (наяханский комплекс) смешанного состава (от среднего до кислого) с наиболее повышенными значениями параметра магнитного поля и средними значениями гамма-поля (0 нТл/км, 15 мкР/ч).

Представленная диаграмма демонстрирует уверенное различие интрузивных массивов и позволяет разделить их по комплексам (рис. 10).

В итоге, по геофизическим материалам, массивы Светлинский, Кобзарь, Нягаинский, Нар-

Таблица 4

**Интрузивные комплексы северной части Балыгычано-Сугойского прогиба**

Комплекс	Массивы	Качественные геофизические характеристики	Рудная специализация
Наяханский	Светлинский, Кобзарь, Нягаинский, Нарзан, Гурзуф	– положительные аномалии локальной составляющей поля силы тяжести; – площадные высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии; – средняя радиоактивность; калиевая радиогеохимическая специализация горных пород	Золото-серебряная
Быстринский	Громадинский, Нижненский	– площадные отрицательные аномалии поля силы тяжести; – площадные слабоинтенсивные отрицательные магнитные аномалии; – высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии контактового ореола; – повышенная радиоактивность; торий-калиевая радиогеохимическая специализация горных пород	
Омсукчанский	Егорлыкский, Марат	– площадные отрицательные аномалии поля силы тяжести; – площадные слабоинтенсивные отрицательные магнитные аномалии; – высокоинтенсивные отрицательные магнитные аномалии контактового ореола (Егорлыкский); – высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии контактового ореола (Марат); – высокая радиоактивность; калиевая, торий-калиевая радиогеохимическая специализация горных пород	Оловянная

зан и Гурзуф отнесены к *наяханскому* комплексу, Громадинский и Нижненский — *быстринскому*, а Егорлыкский и Марат — *омсукчанскому*, что также подтверждается геологическими данными, полученными в процессе ГДП-200 [16; 17].

Поскольку каждый комплекс ассоциируется с соответствующим типом оруденения, то с массивами *наяханского* и *быстринского* комплексов связана золото-серебряная минерализация, а с массивами *омсукчанского* комплекса — оловянная (табл. 4). Следовательно, полученные результаты будут способствовать дальнейшему изучению геологического строения площади и последующему прогнозу благороднометалльного и оловянного оруденения, с выделением перспективных участков в пределах северного фрагмента Балыгычано-Сугойского прогиба.

**Заключение.** Предложенная методика приемов обработки и интерпретации современных геофизических материалов Балыгычанской площади, полученных благодаря высокой точности регистрации физических полей чувствительной аппаратурой и эффективной методике съемки, позволили:

- картировать интрузивные массивы с уточнением контуров распространения и изучением их глубинного строения;

- впервые выделить не вскрытые интрузивные массивы Нарзан и Гурзуф, а также серию даек и малых интрузий;

- изучить внутреннее строение массивов Егорлыкский и Марат с разделением на фазовые и фациальные разности;

- разделить интрузивные образования по геофизическим данным, отражающим различные петрофизические свойства пород (плотность, намагнитченность, содержания ЕРЭ);

- классифицировать интрузивы по комплексам, каждый из которых является перспективным на определенный тип оруденения.

---

1. Арбузов С. И., Рихванов Л. П. Геохимия радиоактивных элементов. — Томск: Издательство ТПУ, 2010. — 300 с.

2. Вавилин Л. Н., Воробьев В. П., Ефимов А. В. Аэрогамма-спектрометрия в геологии. — Л.: Недра, 1982. — 271 с.

3. Государственная геологическая карта РФ третьего поколения. Масштаб 1 : 1 000 000. Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 — Сеймчан / В. М. Кузнецов, С. В. Жигалов— СПб.: ВСЕГЕИ, 2007.

4. Государственная геологическая карта РФ третьего поколения. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист Q-56 — Средне-колымск / В. И. Шпикерман, А. В. Гавриш. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2019.

5. Государственная геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Среднеколымская. Лист Р-56-IV / Б. М. Гусаров. — М.: Мингео СССР, 1983.

6. Государственная геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Верхнеколымская. Лист Р-56-V / В. М. Кузнецов. — М.: Мингео СССР, 1982.

7. Геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Верхнеколымская. Лист Р-56-VI / К. Л. Львов. — М.: Мингео СССР, 1985.

8. Государственная геологическая карта РФ второго поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Сугойская. Лист Р-56-XII / А. Э. Ливач. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2000.

9. Государственная геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Среднеколымская. Лист Q-56-XXXV, XXXVI / В. М. Кузнецов. — М.: Мингео СССР, 1978.

10. Емельяненко П. Ф., Яковлева Е. Б. Петрография магматических и метаморфических пород. — М., 1985. — 247 с.

11. Лазарев Ф. Д., Кирплюк П. В., Онищенко А. Н. Современная геофизическая основа Норильского промышленного района // Геофизические методы при разведке недр: материалы Всероссийской научно-практической конференции. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — С. 228–233.

12. Лазарев Ф. Д., Ромашко В. В., Кирплюк П. В. Естественные радиоактивные элементы — эффективный инструмент прогноза золоторудных объектов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV Международной конференции. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — С. 321–323.

13. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. 5-е изд. — Л.: Недра, 1979. — 351 с.

14. Никитин А. А., Петров А. В. Теоретические основы обработки геофизической информации. — М., 2008. — 112 с.

15. Петров А. В., Трусов А. А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации — КОСКАД 3D // Геофизика. — 2000. — № 4. — С. 29–33.

16. Петрова М. Н., Петров С. Ю. Возраст гранодиоритов северной части Балыгычано-Сугойского прогиба // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. — Якутск, 2019. — С. 102–106.

17. Петрова М. Н. Состав интрузивных образований северной части Балыгычано-Сугойского прогиба (Магаданская область) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы X Всероссийской научно-практической конференции. — Якутск, 2020. — С. 120–123.

18. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. — Л.: Недра, 1974. — 231 с.

19. Средне-мелкомасштабная аэрогамма-спектрометрическая съемка: Методические рекомендации по аэрогамма-спектрометрическому обеспечению региональных прогнозно-металлогенических работ. — Л.: НПО «Рудгеофизика», 1987. — 119 с.

20. Стружков С. Ф., Константинов М. М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. — М.: Научный мир, 2005. — 320 с.

21. Сыромьятников Н. Г. Радиоактивные элементы как геохимические индикаторы породы- и рудообразования. — М.: Атомиздат, 1976. — 232 с.

22. Airborne gamma ray spectrometer surveying. Technical Reports Series No. 323. — IAEA, Vienna, Austria, 1991. — 116 p.

---

1. Arbuzov S. I., Rikhvanov L. P. Geochemistry of radioactive elements [Geochemistry of radioactive elements]. Tomsk, 2010, 300 p.

2. Vavilin L. N., Vorob'ev V. P., Efimov A. V. Aerogamma-spektrometriya v geologii [Aerogamma-spectrometry in geology]. Leningrad, Nedra, 1982, 271 p.

3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF tret'ego pokoleniya. Masshtab 1 : 1 000 000. Seriya Verkhoyano-Kolymskaya. List P-56 — Seymchan [State geological map of the Russian Federation of the third generation. Scale 1 : 1,000,000. Verkhoyano-Kolymskaya series. Sheet P-56 — Seimchan]. Eds.: V. M. Kuznetsov, S. V. Zhigalov. St. Petersburg, VSEGEI, 2007.



4. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF tret'ego pokoleniya. Masshtab 1 : 1 000 000. List Q-56 – Srednekolymsk [State geological map of the Russian Federation of the third generation. Scale 1:1,000,000. Sheet Q-56 – Srednekolymsk]. Eds.: V. I. Shpikerman, A. V. Gavrish. St. Petersburg, 2019.
5. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR pervogo pokoleniya. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Srednekolymskaya. List P-56-IV [State geological map of the USSR of the first generation. Scale 1:200,000. Srednekolymskaya series. Sheet P-56-IV]. Ed.: B. M. Gusarov. Moscow, 1983.
6. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR pervogo pokoleniya. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Verkhnekolymskaya. List P-56-V [State geological map of the USSR of the first generation. Scale 1:200,000. Verkhnekolymskaya series. Sheet P-56-V]. Ed.: V. M. Kuznetsov. Moscow, 1982.
7. Geologicheskaya karta SSSR pervogo pokoleniya. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Verkhnekolymskaya. List P-56-VI [Geological map of the USSR of the first generation. Scale 1:200,000. Verkhnekolymskaya series. Sheet P-56-VI]. Ed.: K. L. L'vov. Moscow, 1985.
8. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF vtorogo pokoleniya. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Sugoyskaya. List P-56-XII [State geological map of the Russian Federation of the second generation. Scale 1:200,000. Sugoyskaya series. Sheet P-56-XII]. Ed.: A. E. Livach. St. Petersburg, VSEGEI, 2000.
9. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR pervogo pokoleniya. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Srednekolymskaya. List Q-56-XXXV, XXXVI [State geological map of the USSR of the first generation. Scale 1:200,000. Srednekolymskaya series. Sheet Q-56-XXXV, XXXVI]. Ed.: V. M. Kuznetsov. Moscow, 1978.
10. Emel'yanenko P. F., Yakovleva E. B. Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod [Petrography of magmatic and metamorphic rocks]. Moscow, 1985, 247 p.
11. Lazarev F. D., Kirplyuk P. V., Onishchenko A. N. Sovremennaya geofizicheskaya osnova Noril'skogo promyshlennogo rayona [Modern geophysical basis of the Norilsk industrial region]. *Geofizicheskie metody pri razvedke nedr: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tomsk, 2016, pp. 228–233. (In Russian).
12. Lazarev F. D., Romashko V. V., Kirplyuk P. V. Estestvennye radioaktivnye element – effektivnyy instrument prognoza zolotorudnykh ob"ektov [Natural radioactive elements – an effective tool for forecasting gold ore objects]. *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii*. Tomsk, 2013, pp. 321–323. (In Russian).
13. Logachev A. A., Zakharov V. P. Magnitorazvedka. 5-e izdanie [Magnetic prospecting. 5th edition]. Leningrad, Nedra, 1979, 351 p.
14. Nikitin A. A., Petrov A. V. Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii [Theoretical foundations of geophysical information processing]. Moscow, 2008, 112 p.
15. Petrov A. V., Trusov A. A. Komp'yuternaya tekhnologiya statisticheskogo i spektral'no-korrelyatsionnogo analiza trekhmernoy geoinformatsii – KOSKAD 3D [Computer technology of statistical and spectral-correlation analysis of three-dimensional geoinformation – KOSKAD 3D]. *Geofizika*, 2000, № 4, pp. 29–33. (In Russian).
16. Petrova M. N., Petrov S. Yu. Vozrast granodioritov severnoy chasti Balygychano-Sugoyskogo progiba [The age of granodiorites in the northern part of the Balygychan-Sugoy Trough]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yakutsk, 2019, pp. 102–106. (In Russian).
17. Petrova M. N. Sostav intruzivnykh obrazovaniy severnoy chasti Balygychano-Sugoyskogo progiba (Magadanskaya oblast') [Composition of intrusive formations in the northern part of the Balygychan-Sugoy Trough (Magadan Region)]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yakutsk, 2020, pp. 120–123. (In Russian).
18. Smyslov A. A. Uran i toriy v zemnoy kore [Uranium and thorium in the earth's crust]. Leningrad, Nedra, 1974, 231 p.
19. Sredne-melkomasshtabnaya aerogamma-spektrometricheskaya s'emka: Metodicheskie rekomendatsii po aerogamma-spektrometricheskomu obespecheniyu regional'nykh prognozno-metallogenicheskikh rabot [Medium-small-scale airborne gamma-spectrometric survey: Methodical recommendations for airborne gamma-spectrometric support of regional forecasting and metallogenetic works]. Leningrad, 1987, 119 p.
20. Struzhkov S. F., Konstantinov M. M. Metallogeniya zolota i serebra Okhotsko-Chukotskogo vulkanogenno go poyasa [Metallogeny of gold and silver of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt]. Moscow, Nauchnyy mir, 2005, 320 p.
21. Syromyatnikov N. G. Radioaktivnye elementy kak geokhimicheskie indikatory porodo- i rudoobrazovaniya [Metallogeny of gold and silver of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt]. Moscow, Atomizdat, 1976, 232 p.
22. *Airborne gamma ray spectrometer surveying. Technical Reports Series No. 323*. IAEA, Vienna, Austria, 1991, 116 p.

---

Леденский Роман Андреевич – геофизик, Норильский филиал Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (НФ ВСЕГЕИ). Ул. Ленинский пр., 21-а, Норильск, Красноярский край, Россия, 663300. <ledenskiyra@yandex.ru>

Ledenskiy Roman Andreevich – Geophysicist, The Norilsk branch of A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI Norilsk Branch). Ul. Leninskiy prospekt, 21-a, Norilsk, Krasnoyarskiy kray, Russia, 663300. <ledenskiyra@yandex.ru>