

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГИБА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГРАВИМАГНИТНЫХ СЪЁМОК

С.Р. Иванова, А.Н. Обухов, А.А. Корнеев, С.Л. Каламкарров,
И.Ф. Лошакова, Т.Б. Соколова*

Приведены новые данные потенциальных полей, сопоставленные с предыдущими представлениями о региональном строении и рифтовом генезисе фундамента Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП). Двумерное моделирование по геофизическим данным подтверждает результаты предыдущих работ по части выделения двух типов фундамента, а также согласуется с гравитационно-геодинамической концепцией образования Енисей-Хатангского регионального прогиба и осложняющих его тектонических структур, таких как Рассохинский и Балахнинский мегавалы. Также в результате исследования потенциальных полей установлено наличие в фундаменте большого объёма магматических масс ультраосновного и основного состава в осевой части ЕХРП, пермо-триасового возраста, что подтверждает рифтовый режим развития региона.

Ключевые слова: Енисей-Хатангский региональный прогиб, Рассохинский, Балахнинский мегавал, рифтовая модель, аэромагнитная, аэрогравиметрическая съёмка.

Ссылка для цитирования: Иванова С.Р., Обухов А.Н., Корнеев А.А., Каламкарров С.Л., Лошакова И.Ф., Соколова Т.Б. Геолого-геофизическая модель центральной части Енисей-Хатангского регионального прогиба по результатам комплексной интерпретации современных сейсмических и гравимагнитных съёмок // Жизнь Земли. 2024. Т. 46, № 3. С. 278–289. DOI: 10.29003/m4183.0514-7468.2023_46_3/278-289.

Поступила 17.08.2024 / Принята к публикации 28.08.2024

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MODEL OF THE CENTRAL PART OF THE YENISEI-KHATANGA REGIONAL TROUGH BASED ON THE RESULTS OF COMPREHENSIVE INTERPRETATION OF MODERN SEISMIC AND GRAVITY-MAGNETIC SURVEYS

S.R. Ivanova¹, A.N. Obukhov¹, A.A. Korneyev¹, S.L. Kalamkarov¹,
I.F. Loshakova¹, T.B. Sokolova²

¹ Russian Research Geological Petroleum Institute

² Lomonosov Moscow State University

New data on potential fields are presented, compared with previous ideas about the regional structure and rift genesis of the Yenisei-Khatanga regional depression basement. Our 2D modeling based on geophysical data confirms the results of previous works regarding the identification of two types of the basement, and is consistent with the gravity-geodynamic

* Иванова Софья Романовна – геофизик, ORCID: 0009-0002-9480-9013, s.ivanova@vnigni.ru; Обухов Александр Николаевич – д.г.-м.н., г.н.с., ORCID: 0009-0004-3701-8340, obukhov@vnigni.ru; Корнеев Антон Александрович – зав. сектором, ORCID: 0009-0007-0693-2545, korneyev@vnigni.ru; Каламкарров Сергей Львович – с.н.с., ORCID: 0009-0003-6362-4742, Kalamkarov@vnigni.ru; Лошакова Инна Фёдоровна – ведущий геофизик, ORCID: 0009-0008-4036-0429, loshakova@vnigni.ru; ФГБУ «ВНИГНИ»; Соколова Татьяна Борисовна – к.г.-м.н., с.н.с., МГУ имени М.В. Ломоносова, ORCID: 0000-0003-4956-3464, tb-sokolova@yandex.ru.

concept of the formation of the Yenisei-Khatanga regional trough and the tectonic structures that complicate it, such as the Rassokhinsky and Balakhna megaridges. Also, as a result of our study of potential fields, the presence of a large volume of magmatic masses of ultrabasic and basic composition in the axial part of the Yenisei-Khatanga regional trough, Permian-Triassic age, was established, which confirms the rift mode of the region's development.

Keywords: Yenisei-Khatanga regional trough, Rassokhinsky, Balakhna megaridge, rift model, aeromagnetic, aerogravimetric survey.

For citation: Ivanova, S.R., Obukhov, A.N., Korneyev, A.A., Kalamkarov, S.L., Loshakova, I.F., Sokolova, T.B., "Geological and geophysical model of the central part of the Yenisey-Khatanga regional through based on the results of comprehensive interpretation of modern seismic and gravity-magnetic surveys", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **46**, no 3, 278–289 (2024) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4183.0514-7468.2023_46_3/278-289.

Тектоническое строение Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП).

Важными характеристиками ЕХРП являются глубокий (более 15 км) центральный прогиб и прибортовые валы с зоной отсутствия в их разрезе верхнепалеозойского терригенного комплекса. На северном борту это Тетояский, Тарейский валы, на южном припуторанском борту – Пясино-Самоедский. Центральная часть рифтового прогиба (Центрально-Таймырский жёлоб), в свою очередь, осложнена Рассохинским и Балахнинским мегавалами, являющимися частью крупной Обско-Лаптевской гряды [4]. Рифтовая система Енисей-Хатангского регионального прогиба проявляется в рельефе фундамента в виде глубокой субширотной зоны аномальных глубин, а в её осевой зоне выделяется инверсионная мезозойская система мегавалов. На бортах ЕХРП сейсмические отражения прослеживаются на глубины до 18 км и образуют на бортах наклонные границы SDR в пермо-триасовой туфолаковой толще, что подтверждено бурением на Гольчихинской и Хабейской площадях. На Рассохинском и Балахнинском мегавалах сейсмокомплексы мезозоя образуют поднятия амплитудой более 5 км, с которыми связаны зоны развития неокомских клиноформ. Наличие в осадочном чехле Енисей-Хатангской НГО резко дисгармоничных этажей палеозойского (досреднетриасового) и мезозойского возраста говорит о сложном строении фундамента, в котором можно выделить кристаллический и гетерогенный тип.

По результатам палеорекострукции с использованием новых сейсмических данных были уточнены основные тектонические события: смена карбонатного платформенного режима (D-C2) на терригенно-угленосный (C2-P1) и последующий вулканогенный (P3-T1), а также главная фаза тектоногенеза – средний–поздний триас (T2-T3) с активизацией неокомского клиноформного события.

В последнее время крайне актуален вопрос нефтегазоносности всего Енисей-Хатангского регионального прогиба. Новейшие палеотектонические реконструкции истории развития Енисей-Хатангской НГО существенно уточняют нефтегазоносные перспективы региона. По результатам исследований установлено, что прибортовые валы представляют собой зоны, в которых нефтегазовые системы досреднетриасового и мезозойского комплексов связаны и образуют совместные зоны нефтегазонакопления.

Крупнейшее изменение структурного плана в совокупности со складчатостью происходило в течение среднего и позднего триаса, которое переформировало и частично разрушило палеозойские скопления УВ. Несмотря на этот факт, главной особенностью Енисей-Хатангской НГО в составе Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции является наличие двух этажей нефтегазоносности – перспективного досреднетриасового

и промышленно нефтегазоносного мезозойского, включая особые прибортовые зоны нефтегазонакопления, в которых перспективен весь палеозойско-мезозойский разрез. Крупнейшая триасовая тектоническая перестройка на севере Сибирского палеоконтинента привела к перестройке палеозойских нефтегазовых систем, палеоскопления в которых переформировывались и часть УВ могла сохраниться в формирующемся мезозойском чехле ЕХРП, особенно в зоне Тарейско-Тетояхского вала.

Основной задачей данного исследования являлось проведение двумерного моделирования комплекса данных геофизических методов: сейсморазведки, гравиразведки, магниторазведки с последующим обновлением, и построение согласованной геолого-геофизической модели строения центральной части Енисей-Хатангского регионального прогиба.

Карта вещественного строения фундамента. В исследовании использованы новые аэрогравимагнитные данные, сопоставленные с предыдущими региональными построениями рифтовой модели [1, 2]. По плотностным и магнитным аномалиям выделены зоны вещественно-петрофизических комплексов, представленные центральной субширотной протяжённой зоной гипербазитов, осложнённой крупными вытянутыми вдоль зоны интрузиями габбро, габбро-долеритов и базальтов. Бортовые зоны представлены также вытянутыми телами гранито-гнейсового состава с изометричными штоками дунитов и вытянутыми диапирами габбро-долеритов (рис. 1).

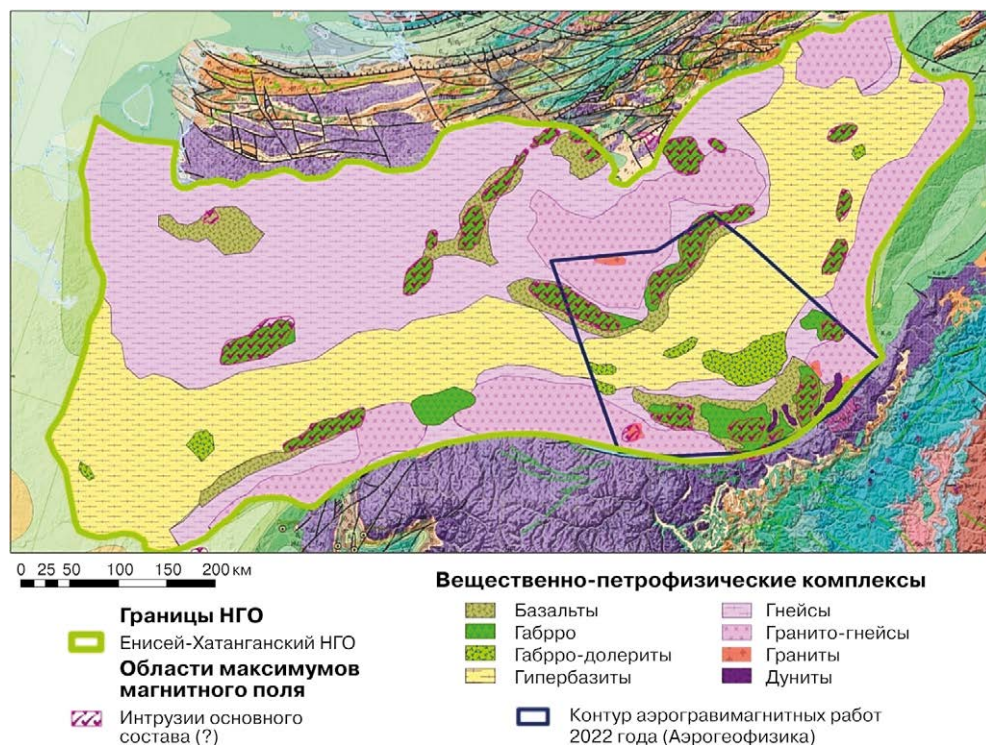


Рис. 1. Схема вещественно-петрофизических комплексов фундамента ЕХРП [5].
Fig. 1. Scheme of the material-petrophysical complexes of the basement of YKRT [5].

Ниже, на **рис. 2**, приводятся гравитационное (А) и магнитное (Б) поля, использованные в качестве исходных при проведении настоящего исследования структуры потенциальных полей (по данным научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского). Уточнённые значения гравитационного и магнитного полей были взяты из региональной работы «Комплексная аэрогеофизическая (аэромагнитная, аэрогравиметрическая) съёмка Енисей-Хатангского прогиба, площади в районе восточной части Рассохинского мегавала и юго-западной части Балахнинского мегавала», выполненной АО «ГНПП «Аэрогеофизика» в 2022 г.

Рассохинский вал выделяется гравитационным максимумом, который, вероятно, связан с процессом инверсионного воздымания пород пермо-триасовой туфо-лавовой

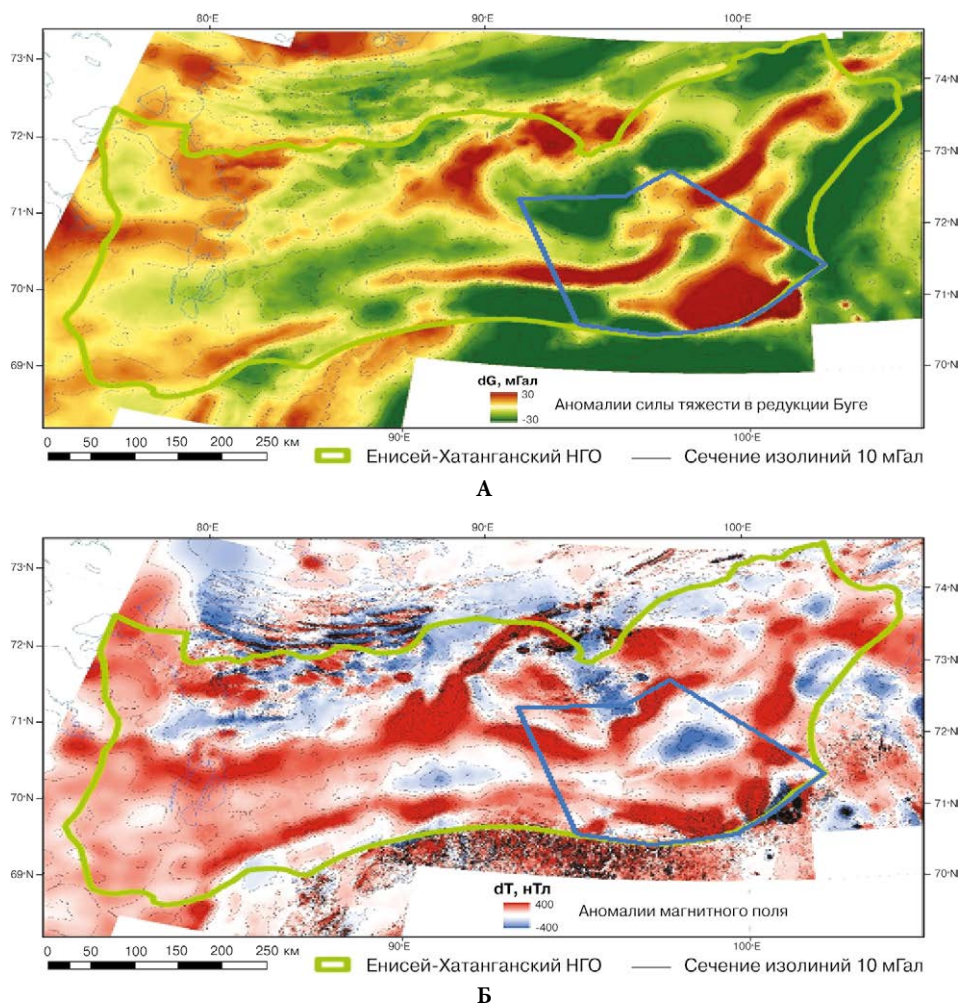


Рис. 2. А: Региональные аномалии поля силы тяжести в редукции Буге ($\sigma=2,67 \text{ г/см}^3$). Синий контур – граница аэрогеофизической съёмки 2022 г. Б: Региональные аномалии магнитного поля T_a . Синий контур – граница аэрогеофизической съёмки 2022 г.

Fig. 2. A: Regional anomalies of the gravity field in the Bouguer reduction ($\sigma=2.67 \text{ g/cm}^3$). Blue contour is the boundary of the 2022 airborne geophysical survey. B: Regional anomalies of the magnetic field T_a . Blue contour is the boundary of the 2022 airborne geophysical survey.

толщи и пород мезозойского комплекса. Также, частично, увеличение гравитационного поля в осевой части может быть результатом внедрения в земную кору тяжёлых мантийных магматических пород. В этой центральной зоне в результате внутриконтинентального рифтогенеза в позднепермское-раннетриасовое время произошло дробление коры с внедрением большого количества даек и интрузий. Причём объём интрузивного материала настолько значителен, что он сам по себе обеспечивает разрыв допермской осадочной толщи.

Магнитные объекты, которые находятся наиболее близко к дневной поверхности в бортовых частях ЕХРП и круто падают к осевой части, связываются с внедрением интрузий, а также с трапповой нижнетриасовой толщей. Магнитные объекты в осевой части прогиба в основном находятся на глубинах более 8 км.

Анализ потенциальных полей приводит к важным тектоническим выводам:

- ✓ рифтовое растяжение ЕХРП и прилегающих бортовых зон создало геомеханические условия для внедрения магматического расплава и образования силлов;
- ✓ рифтовое растяжение территории ЕХРП, как вдоль рифта, так и поперёк (по трансформным разломам), создаёт крупные трещины – разрывы и глобальную сеть трещиноватости, по которым происходит внедрение глубинного магматического материала в виде интрузий и силлов;
- ✓ наличие большого объёма магматических масс в фундаменте ультраосновного и основного состава пермо–триасового возраста в осевой части ЕХРП дополнительно подтверждает рифтовый режим развития региона [5].

Двумерное сейсмо-плотностное моделирование в комплексе с магниторазведкой. Для проведения двумерного сейсмо-плотностного моделирования был выбран сейсмический профиль 622 (рис. 3) с обширным набором геофизической информации: наземная гравиметрическая съёмка (часть профиля проходит через площадь аэрогравиметрических работ 2022 г.), геоэлектрический разрез по результатам МТЗ, Волочанская скважина глубиной 3,5 км, вскрывшая пермо-триасовый СФК.

Основой для построения модели послужила сейсмическая интерпретация, приведённая в геологической модели А.Н. Обухова.

На рис. 3 приведён сейсмический профиль 622, геологическая интерпретация проведена в соответствии с прокоррелированными отражающими сейсмическими горизонтами.

Одной из задач нашего исследования являлась актуализация геолого-тектонической модели ЕХРП Обухова А.Н. в аспекте наличия и положения магматических интрузий в аномальной осевой части Енисей–Хатангского рифта.

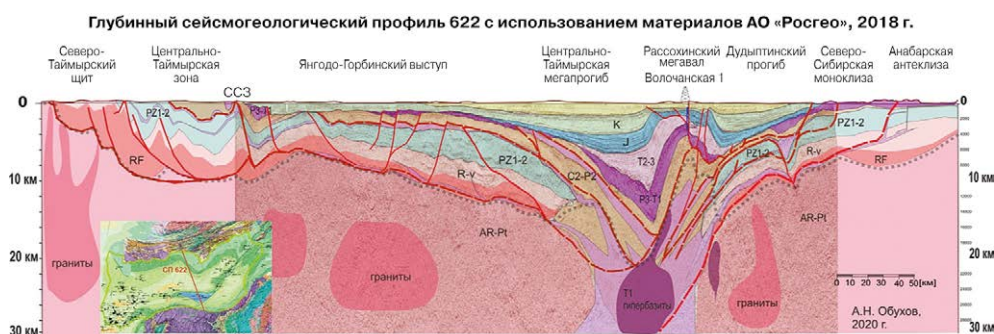


Рис. 3. Начальная геологическая модель по сейсмическому профилю 622, предоставленная А.Н. Обуховым, 2020 г.

Fig. 3. Starting geological model for seismic profile 622, provided by A.N. Obukhov, 2020.

Плотностные характеристики пород комплекса осадочного чехла были определены по плотностной колонке скважины Волосанская-1 (рис. 4).

Чёрным цветом указано распределение плотности с шагом 1 м, красным – осреднённое в окне 50 м.

Данные по глубинным комплексам осадочного чехла, фундамента и интрузивным образованиям, а также магнитные свойства всего разреза определялись согласно обобщениям, представленным в геологических отчётах В.И. Казаиса (2001), Ф.Д. Лазарева (2000), А.П. Четвергова (1998), Гольтбурта (1967), Н.М. Ивановой (2012), а также по данным Куликова, Мелихова (2006) о физических свойствах данного региона, приведённым в табл. 1.

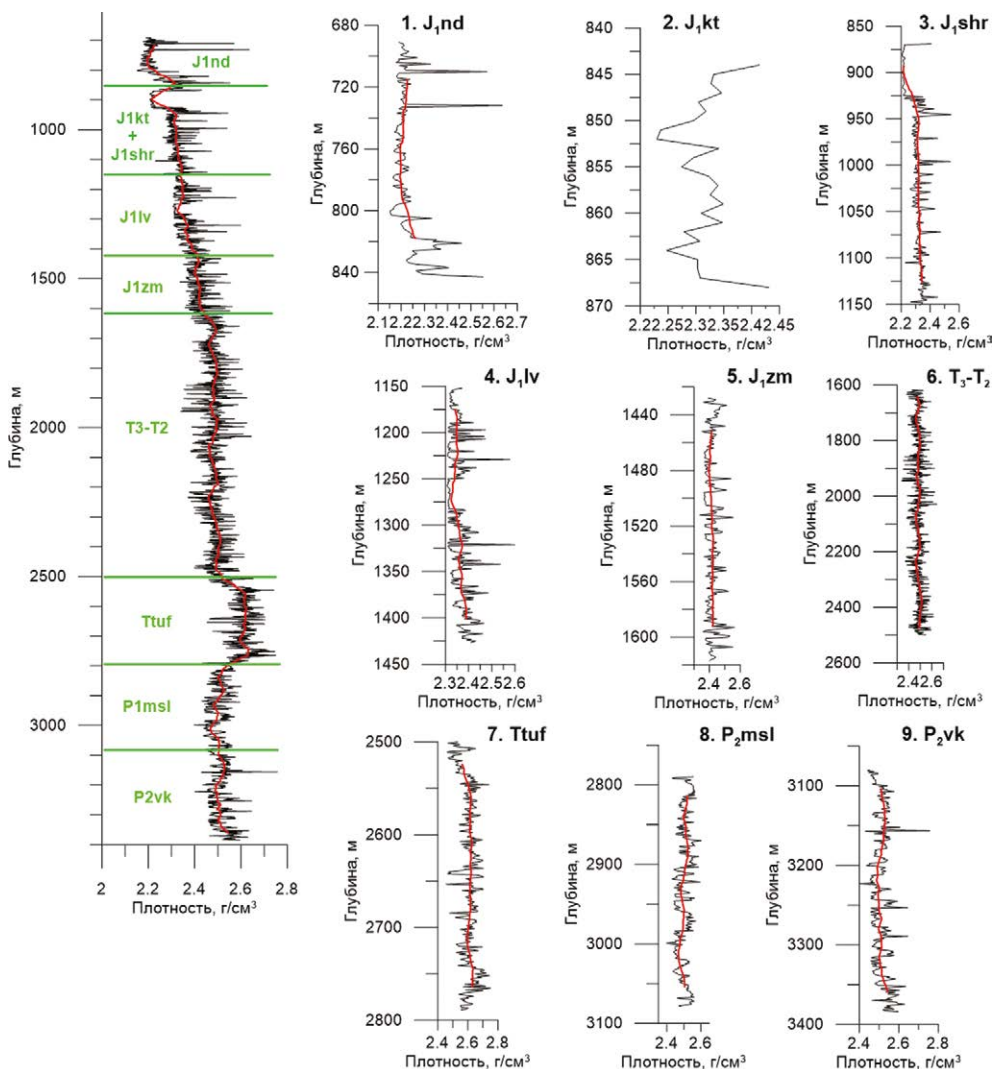


Рис. 4. Плотностная колонка по скважине VLN-1 [по: 3].

Fig. 4. Density column of the VLN-1 well [3].

Таблица 1. Принятые физические свойства слоёв стартовой модели на основе существующих данных о регионе

Table 1. Adopted physical properties of the starting model layers based on existing data of the region

Толща	σ ср., г/см ³	χ ср., 10^{-5} СИ
К	2,25	44
Ј	2,35	44
T2-3	2,65	1000
P2-T1	2,5	1500
C2-P2	2,5	1500
PZ1-2	2,65	0
Фк	2,75	2000
ФГ	2,9	3250
Интрузии	2,9	3250

Также в качестве дополнительной априорной информации о разрезе использовались результаты интерпретации аэрограмм и магнитной съёмки 2022 г. компанией АО «ГНПП «Аэрогеофизика» [8, кн. 2, с. 57] о залегании магнитных объектов вблизи оси рифта: «Отрицательная аномалия магнитного поля, наблюдаемая в центре прогиба, связана в основном с полого залегающими магнитными объектами, располагающимися в бортах структуры».

Кроме того, по результатам аэрогеофизических работ на территории ЕХРП было выделено два типа фундамента: кристаллический (AR) и гетерогенный (рифтовый, P-T) [7]. Кристаллический фундамент полого погружается к центру рифта, а гетерогенный «наплывает» сверху, одновременно с этим по трансформным разломам внедряются крупные интрузии (рис. 5).

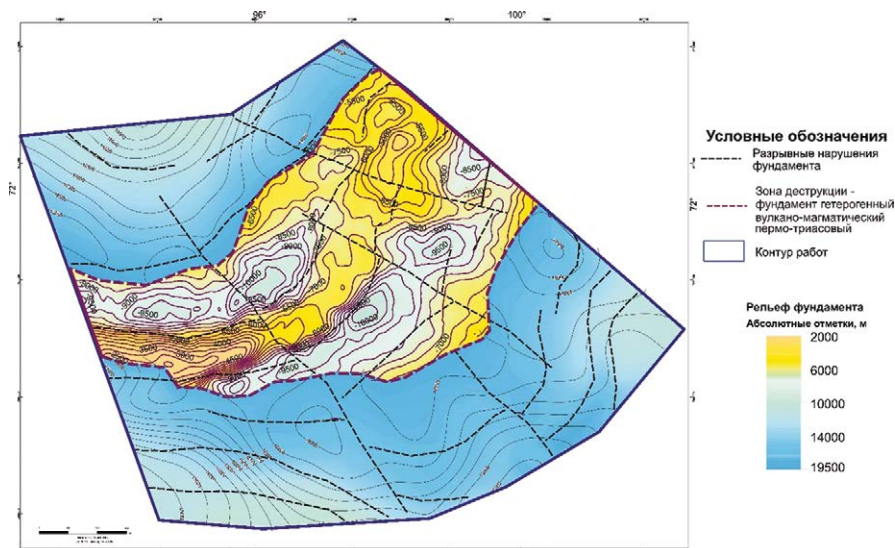


Рис. 5. Схема рельефа консолидированного фундамента и рельефа гетерогенного фундамента по данным АО «ГНПП «Аэрогеофизика» 2022 г.

Fig. 5. Relief scheme of the JSC «GNPP Aerogeofizika» 2022.

Обобщая все вышеприведённые данные, были построены стартовые модели плотностного и магнитного разрезов (рис. 6). Невязка рассчитанного поля от модели с наблюдаемым гравитационным полем составила 50,285 мГал (60,59 %), с магнитным – 215,81 нТл (23,43 %).

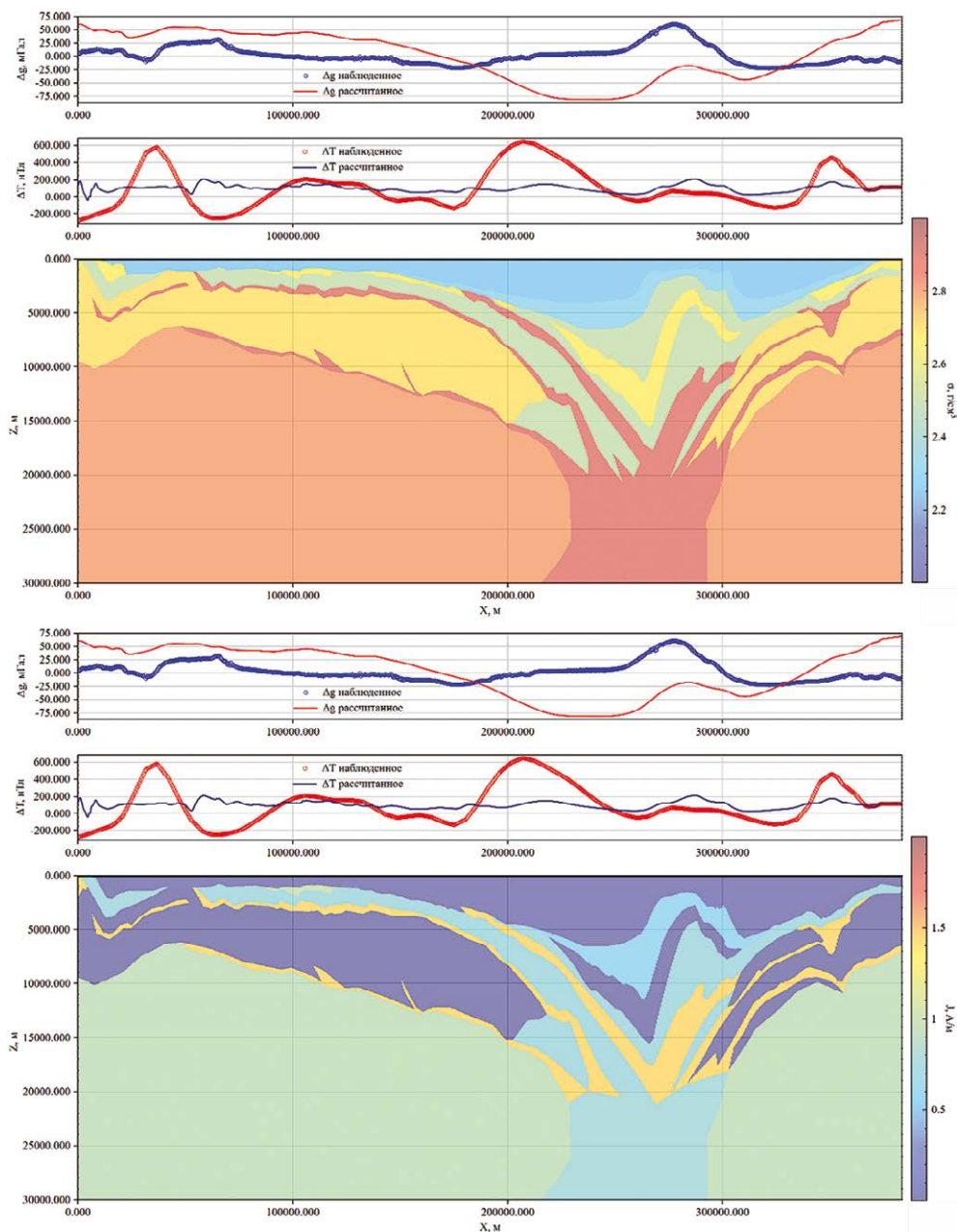


Рис. 6. Стартовая модель разреза распределения плотности и намагниченности по профилю 622.
Fig. 6. Starting model of the section of density and magnetization distribution along profile 622.

В первом приближении мы столкнулись с проблемой неточного положения интрузивных тел и неясностью положения гетерогенного триасового фундамента в центральной части.

Решение этой обратной задачи происходило методом интерактивного подбора с помощью созданного вручную регуляризатора и доподбора с помощью автоматической инверсии для достижения плавного, не константного, латерального распределения свойств в разрезе (программное обеспечение – GravMagInv2D). В итоге удалось достичь невязки по гравитационному полю 1,878 мГал (2,26 %), а по магнитному – 24,31 нТл (2,64 %). Согласованность итоговых моделей также достигает приемлемого уровня для дальнейших выводов и геологической интерпретации (рис. 7).

В итоге удалось добиться согласованного положения интрузивных тел. Была показана яркая неоднородность кристаллического фундамента и чётко прорисован гетерогенный фундамент на глубине около 10 000 м, что согласуется с рис. 5.

Итоговая геологическая модель строения центральной части Енисей-Хатангского регионального прогиба. Полученные разрезы распределения плотности и намагниченности

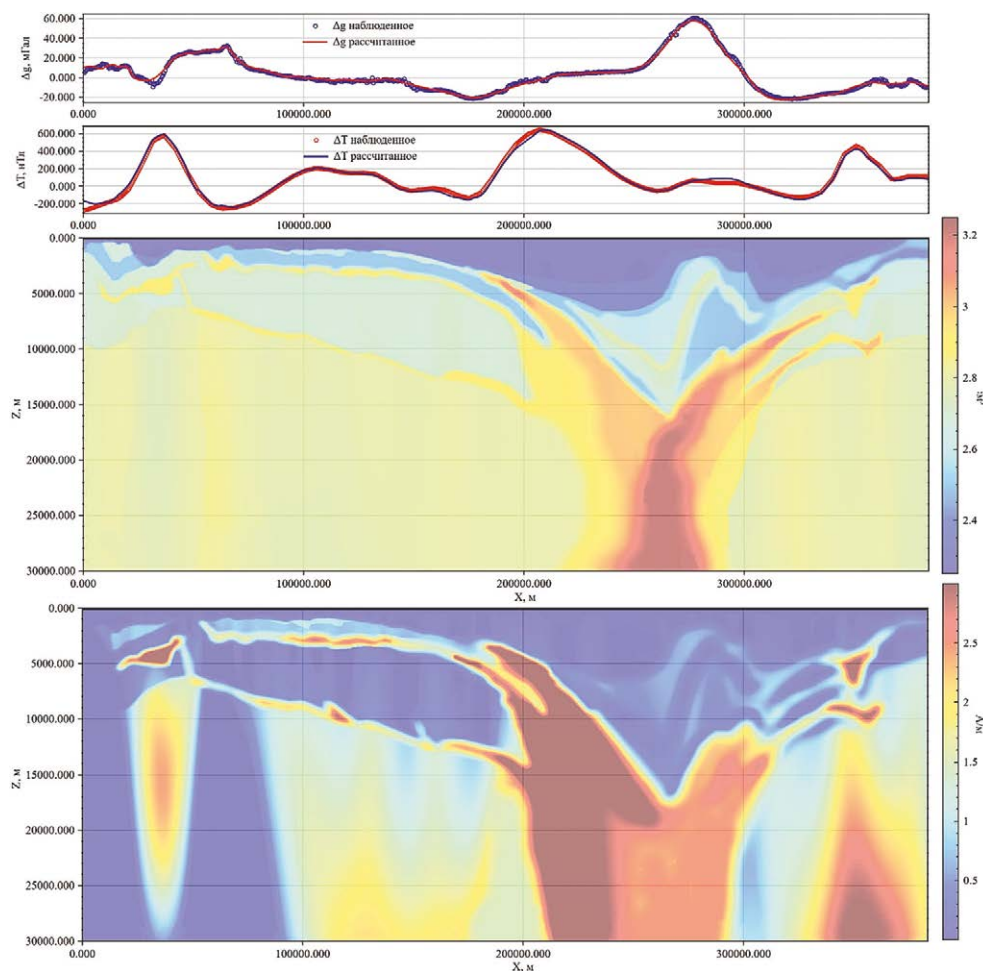


Рис. 7. Итоговый разрез распределения плотности и намагниченности по профилю 622.

Fig. 7. Final section of the density and magnetization distribution along profile 622.

ности были совместно проинтерпретированы с использованием данных о сейсмических горизонтах для разделения неконтрастных отложений юрско-мелового бассейна и рифей-нижнепалеозойских отложений. Итоговая геологическая модель представлена на **рис. 8**.

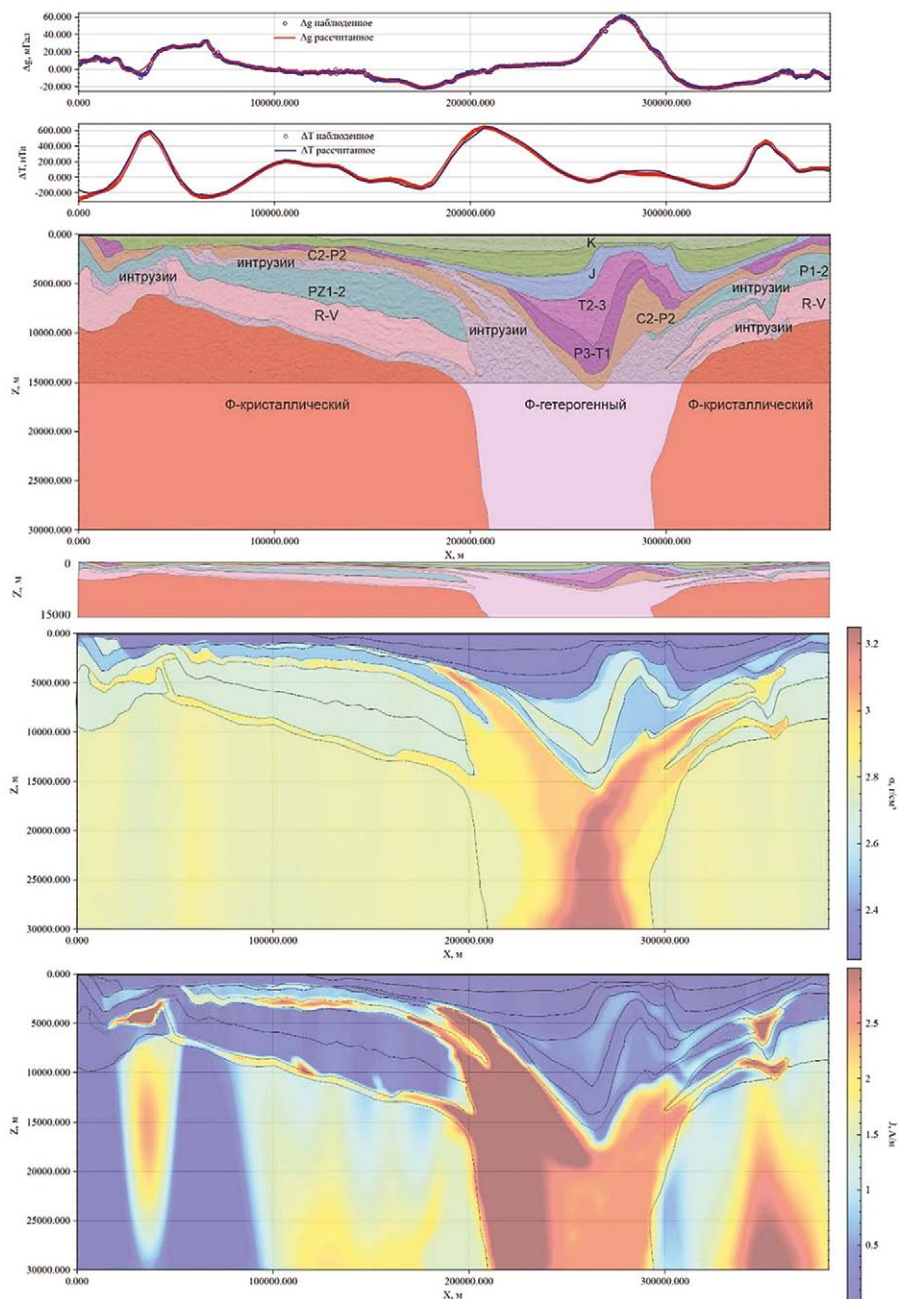


Рис. 8. Итоговая геологическая модель по профилю 622.

Fig. 8. Final geological model for profile 622.

Данный разрез согласуется с заданной тектонической рифтовой моделью развития региона. Отчётливо выделяются два типа фундамента: кристаллический архейский и гетерогенный пермо-триасовый. Большие объёмы интрузий основного состава внедрялись по разломам, образовывавшимся в результате растяжения территории в процессе рифтинга.

Предположительно, образование валов в осадочном чехле связано с процессом гравитационного «сползания» отложений по образовавшимся интрузиям, полого наклонённым к центру рифта. Далее встречные потоки сминали друг друга, образовывая валы в обстановке общего растяжения территории.

Рифтинг со всеми сопутствующими тектоническими событиями завершился в триасе, соответственно юрско-меловой бассейн лишён интрузивных образований.

Таким образом, итоговая геолого-геофизическая модель подтверждает рифтовую обстановку образования региона исследования и согласуется с концепцией гравитационно-геодинамического образования Рассохинского и Балахнинского мегавалов.

Выводы. В результате исследования потенциальных полей установлено наличие в фундаменте большого объёма магматических масс ультраосновного и основного состава в осевой части ЕХРП, а также их пермо-триасовый возраст, подтверждающий рифтовый режим развития региона.

Рассохинский мегавал, выраженный чёткими локальными линейными аномалиями поля силы тяжести в редукции Буге, в остаточных аномалиях не проявлен; этим доказывается, что вал не является унаследованной структурой фундамента.

Итог двумерного моделирования по геофизическим данным подтверждает результаты предыдущих работ [6] по части выделения двух типов фундамента и пологого погружения аномалообразующих тел к осевой части рифта, а также согласуется с гравитационно-геодинамической концепцией образования Енисей-Хатангского регионального прогиба и осложняющих его тектонических структур, таких как Рассохинский и Балахнинский мегавалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М. Объёмная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика. 2017. Вып. 2. С. 60–68.
2. Афанасенков А.П., Обухов А.Н., Чикишев А.А. К вопросу о рифтогенезе Енисей-Хатангского регионального прогиба // Новые идеи в геологии нефти и газа-2017. М.: МГУ, 2017. С. 241–247.
3. Афанасенков А.П., Обухов А.Н., Чикишев А.А., Шайдаков В.А., Бордюг А.В., Каламкаров С.Л. Тектоника северного обрамления Сибирской платформы по результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных // Геология нефти и газа. 2018. № 1. С. 5–25.
4. Балдин В.А., Мунасытов Н.З. Геология и нефтегазоносность Обско-Лаптевской гряды, крупнейшей на севере Сибири надпорядковой положительной мегаструктуры // Геология и геофизика – 2022: наука, производство, инновации. Материалы II Межд. научно-практич. конф. Тверь, 2022. С. 144–147.
5. Иванова С.Р., Корнеев А.А., Лошакова И.Ф., Каламкаров С.Л. Новые аспекты тектоники и нефтегазоносности Рассохинского мегавала по результатам комплексных сейсморазведочных и аэрогравимагнитных работ // Тр. VII Межд. геолого-геофизической конф. «ГеоЕвразия-2024. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес». Т. I. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024. С. 173–177.
6. Обухов А.Н. Гравитационная геодинамика при нефтегазопроисводческих работах // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. М.: Изд-во МГУ, 2015. С. 41–46.
7. Обухов А.Н. и др. К вопросу рифтовой модели Енисей-Хатангского регионального прогиба // Тез. докл. ГеоЕвразия-2021. С. 307–311.

8. Обухов А.Н., Кравченко М.Н., Уклова Г.Д. и др. Комплексная аэрогеофизическая (аэромагнитная, аэрогравиметрическая) съёмка Енисей-Хатангского прогиба, площади в районе восточной части Рассохинского мегавала и юго-западной части Балахнинского мегавала. М., 2022. Росгеолфонд, Центральное фондохранилище, № 546354.

REFERENCES

1. Afanasenkov, A.P., Lygin, I.V., Obukhov, A.N., Sokolova, T.B., Kuznetsov, K.M., "Volumetric reconstruction of tectonic elements of the Yenisei-Khatanga rift system based on the results of complex geological and geophysical interpretation", *Geophysics* **2**, 60–68 (2017) (in Russian).
2. Afanasenkov, A.P., Obukhov, A.N., Chikishev, A.A., "On the issue of rifting of the Yenisei-Khatanga regional trough", *New Ideas in Oil and Gas Geology-2017* (Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2017) (in Russian)
3. Afanasenkov, A.P., Obukhov, A.N., Chikishev, A.A., Shaydakov, V.A., Bordyug, A.V., Kalamkarov, S.L., "Tectonics of the northern framing of the Siberian platform based on the results of a comprehensive analysis of geological and geophysical data", *Geology of oil and gas* **1**, 5–25 (2018) (in Russian).
4. Baldin, V.A., Munasypov, N.Z., "Geology and the oil and gas potential of the Ob-Laptev ridge, the largest supra-order positive megastructure in northern Siberia", *Geology and Geophysics – 2022: Science, Production, Innovations. Proc. of the II International Scientific and Practical Conference* (Tver, 2022, 144–147) (in Russian).
5. Ivanova, S.R., Korneyev, A.A., Loshakova, I.F., Kalamkarov, S.L., "New aspects of tectonics and oil and gas potential of the Rassokhinsky megaswell based on the results of complex seismic exploration and airborne gravity magnetic works", *Proc. of the VII International Geological and Geophysical Conference "GeoEurasia-2024. Geological exploration technologies: science and business* **I**, 173–177 (2024) (in Russian).
6. Obukhov, A.N., "Gravity geodynamics in oil and gas exploration", *New ideas in the geology and geochemistry of oil and gas* (Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2015, 41–46) (in Russian).
7. Obukhov, A.N., et al., "On the issue of the rift model of the Yenisei-Khatanga regional trough", *Abstract of a Report at GeoEurasia-2021*, 307–311 (2021) (in Russian).
8. Obukhov, A.N., Kravchenko, M.N., Ukhlova, G.D., et al., *Integrated airborne geophysical (aeromagnetic, airborne gravimetric) survey of the Yenisei-Khatanga trough, the area in the region of the eastern part of the Rassokhinsky megaswell and the southwestern part of the Balakhna megaswell* (Moscow, Rosgeolfond, Central repository, No. 546354) (2022) (in Russian).