

ГРАВИТИРУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ ПРЕДУРАЛЬСКОГО КРАЕВОГО ПРОГИБА

© 2025 С.Г. Бычков, Г.П. Щербинина, Г.В. Простолупов

Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, 614007; e-mail: bsg@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 02.04.2025; после доработки 27.05.2025; принята в печать 25.06.2025

Почти за столетнюю историю гравиметрических исследований различными геофизическими организациями практически вся территория Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба закрыта крупномасштабными полевыми съемками, что позволило создать сводную гравиметрическую карту и выделить на ней основные гравитирующие геологические объекты. Общее погружение поверхности фундамента и нижних слоев осадочного чехла, а также нижепермский терригенный клин создают общее уменьшение значений гравитационного поля на восток примерно на 30 мГал. Соляная толща Верхнекамского месторождения создает локальные гравитационные аномалии разного знака амплитудой до нескольких мГал. Серии Дуринских и Боровицких впадин в кровле соляной залежи делят пространство Соликамской депрессии на три части — северную, среднюю, южную. Каждая часть характеризуется своими особенностями гравитационного поля, обусловленными разным строением осадочного чехла. Проведенный качественный анализ аномалий силы тяжести позволил уточнить глубинное строение Соликамской впадины и выявить степень влияния различных геологических объектов на формирование гравитационного поля территории.

Ключевые слова: Предуральский прогиб, Соликамская впадина, соли, гравитационные аномалии.

ВВЕДЕНИЕ

Соликамская впадина расположена в центральной части Предуральского краевого прогиба, который представляет собой глобальную сложнопостроенную структуру — сочленение древней платформы и складчатой области герцинид Урала (Хаин, 2001). Это один из самых крупных краевых прогибов мира (Пушаровский, 1959). Структурно Предуральский прогиб представляет погружение кратона под складчатый Урал. Погружение в восточном направлении испытывают поверхность кристаллического фундамента и нижние слои осадочного чехла.

В конце каменноугольного – начале пермского периода горообразовательные движения на территории Урала привели к формированию на всей восточной окраине Восточно-Европейской платформы предгорного прогиба. В раннепермское время в соответствующих тектонических условиях в прогибе сформировалось несколько полос рифов. Одновременно прогиб постепенно заполнялся осадками, сносимыми с Уральских гор.

На заключительной стадии его эволюции сформировалась нижепермская галогенная формация.

В пределах прогиба расположены месторождения углеводородов Волго-Уральской и Тимано-Печерской нефтегазоносных провинций, Воркутинский и Кизеловский угольные бассейны, одно из крупнейших в мире Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС). Благодаря высоким перспективам прогиба на обнаружение месторождений полезных ископаемых на его территории активно ведутся геолого-геофизические работы (Бычков и др., 2009; Грунис и др., 2021; Казанцева, 2014; Масагутов и др., 2021; Неганов и др., 2000; Ступакова, 2017; Трапезников, 2018; Чадаев и др., 2011; Щербинина, Простолупов, 2018 и др.).

Соликамская впадина представляет собой меридионально вытянутую отрицательную тектоническую структуру протяженностью около 250 км, шириной до 70–75 км (рис. 1б). С севера она ограничена Колвинской седловиной, на юге — Косьвинско-Чусовской. Седловины

ГРАВИТИРУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

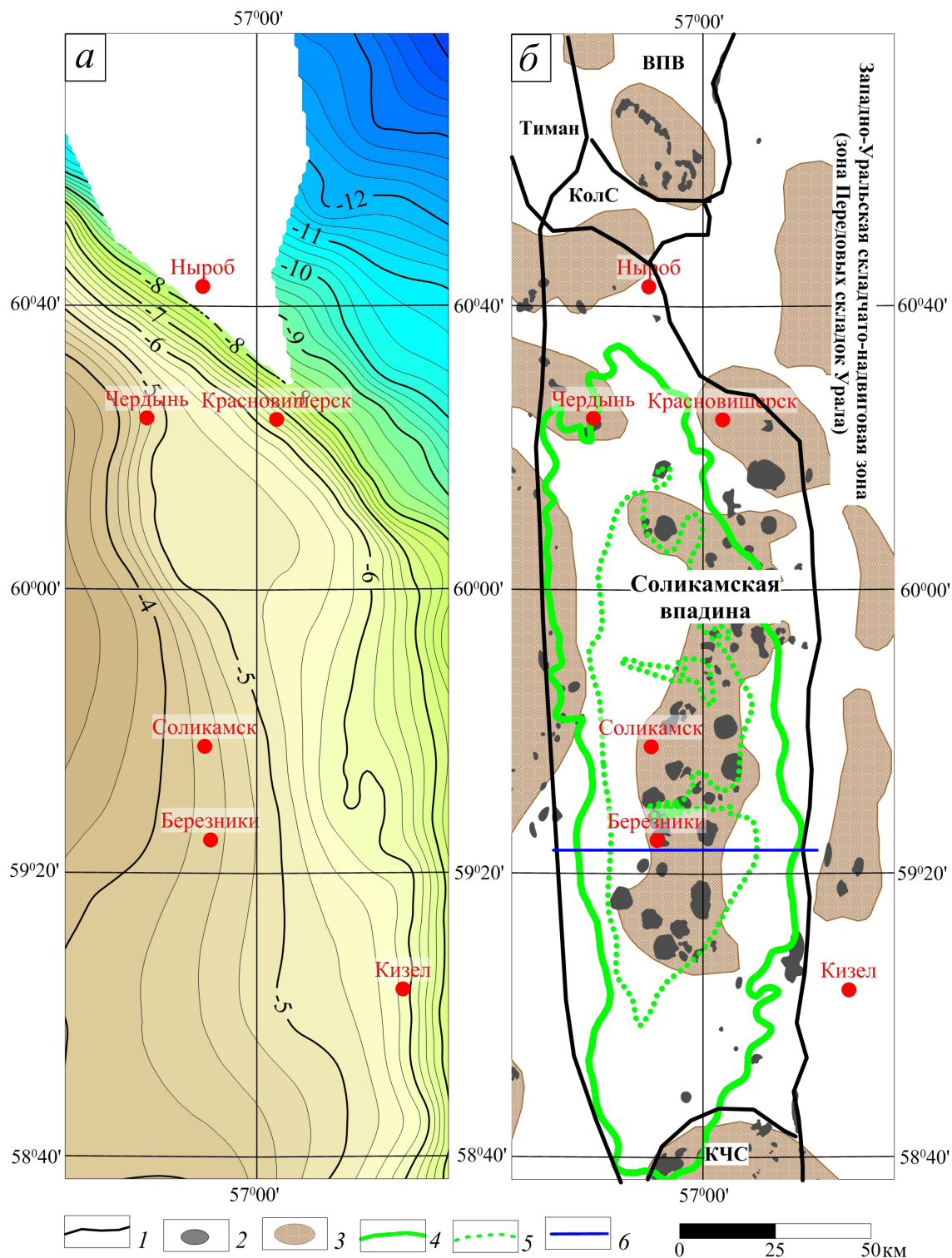


Рис. 1. Структурная карта поверхности фундамента Соликамской впадины (а) и тектоническая схема палеозойских отложений (б): 1 — границы крупных тектонических структур (ВПВ — Верхнепечорская впадина, КолС — Колвинская седловина, КЧС — Косвинско-Чусовская седловина); 2 — месторождения нефти; 3 — рифогенные массивы и палеоплато девонско-турнейского возраста; 4 — граница распространения нижнепермской соляной залежи; 5 — контур залежи калийных солей, 6 — линия геологического разреза, представленного на рис. 2.

Fig. 1. Structural map of the basement surface of the Solikamsk Depression (a) and tectonic scheme of Paleozoic deposits (b): 1 — boundaries of large tectonic structures (ВПВ — Upper Pechora Depression, КолС — Kolvinskaya Saddle, КЧС — Kosvinsko-Chusovskaya Saddle); 2 — oil fields; 3 — reef massifs and paleoplateau of Devonian-Tournaisian age; 4 — boundary of the Lower Permian salt deposit, 5 — contour of the potassium salt deposit; 6 — line of the geological section (Fig. 2).

отличаются повышенным залеганием слоев осадочного чехла. В пределах Соликамской впадины в верхней части осадочного чехла в нижнепермских отложениях расположено Верхнекамское месторождение солей (Кудряшов, 2001). В нижней части осадочного чехла залегают франко-турнейские рифогенные массивы, в структурах облекания которых открыты многочисленные месторождения нефти. Это определяет уникальность Соликамской впадины среди других частей Предуральского прогиба и обуславливает необходимость детального изучения ее строения, проявляющееся в физических полях.

СОЛИКАМСКАЯ ВПАДИНА ПРЕДУРАЛЬСКОГО ПРОГИБА

В широтном направлении Соликамская впадина представляет асимметричную синклинали. Западная ее граница на контакте с Восточно-Европейской платформой проводится условно — с учетом резкого увеличения на восток мощности нижнепермских отложений и появления соляных пород. Восточная граница Предуральского прогиба контролируется региональными Уральскими надвигами.

От западной границы в восточном направлении наблюдается монотонное погружение поверхности кристаллического фундамента и нижних толщ осадочного чехла под Уральские складки (рис. 1а). Абсолютные отметки кровли фундамента на границе с платформой $-3.5 - -4$ км. Фундамент впадины представляет продолжение единого с платформой блока (Камской моноклинали), погружающегося в восточном направлении. На востоке Предуральского прогиба в районе передовых складок Урала поверхность фундамента залегает на отметках более -5 км и уходит под складчатый Урал (Бычков, Неганов, 2010). На севере Соликамской впадины поверхность кристаллического основания погружается до отметок -10 км. Средняя плотность пород фундамента составляет $2.73 - 2.75$ г/см³ (Новоселицкий и др., 1985).

Осадочный чехол, сформировавшийся в платформенных условиях, включает отложения среднего девона, верхнего девона, карбона, пермской системы. Он представлен толщами карбонатных, глинистых, терригенных и галогенных пород. Нижняя часть карбонатного комплекса характеризуется сложным строением, так как включает внутриформационные впадины Камско-Кинельской системы и рифогенные массивы девонско – турнейского возраста (рис. 1б). К настоящему времени на территории Соликамской впадины выявлены многочисленные месторождения нефти, связанные с рифогенными массивами (Бычков и др., 2009).

В конце раннепермского времени наступил период тектонической активизации Уральской горной системы, что дало толчок к формированию предгорного прогиба и накоплению предгорных глинисто-обломочных отложений в виде терригенного клина с уменьшающейся в западном направлении мощностью. Подошва терригенного клина имеет скользящую по разрезу приуроченность. В западном направлении терригенный клин подстилается все более молодыми нижнепермскими карбонатами. Поверхность карбонатов ($P_{1a_{карб}}$) (OGA^k) отделяет нижние платформенные отложения от типичных отложений, заполняющих предгорный прогиб — моласс и соляных отложений.

Таким образом, слои осадочного чехла Соликамской впадины снизу вверх меняют форму своего залегания (рис. 2). Толщи венда, палеозоя, до нижнеуртинских карбонатов включительно, залегают согласно поверхности фундамента — с моноклиальным падением в сторону Урала, угол наклона слоев $1^\circ - 2^\circ$. Залегающие выше нижнепермские молассы (терригенный клин) в условиях формирования уральского предгорья приобрели сильно увеличенную мощность на востоке прогиба. За счет этого кровля терригенного клина и залегающие выше слои имеют другой структурный план. Выше терригенного клина отложения кунгурского яруса формируют синклинали с пологими западным и восточным бортами. Синклинали форма залегания слоев прослеживается вверх от кровли терригенного клина до подошвы соляного комплекса. Соляные отложения (лунежский горизонт кунгурского яруса) заполняют практически всю Соликамскую впадину. Мощность соляной толщи в центральной части впадины достигает 500 м. Горизонтальные размеры соляной линзы 230×70 км. Верхняя часть соляного тела в центральной части Соликамской впадины представлена калийными солями мощностью до 120 м. Размеры калийной залежи 130×40 км.

Таким образом, кунгурский век раннепермского этапа геологического развития территории завершился формированием наложенного Предуральского краевого прогиба.

В отличие от подошвы соляного комплекса его верхняя поверхность в настоящее время характеризуется отсутствием корытообразной формы и наличием хорошо выраженных куполов и впадин. Амплитуды их достигают 150–200 м. В результате этого перекрывающие соль верхнепермские слои залегают конформно неровной поверхности соляной толщи, образуя складки. Надсоляные слои, изменяющейся за счет верхней денудации мощности (100–400 м), сложены терригенными, глинистыми породами с прослоями карбонатных и сульфатных.

ГРАВИТИРУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

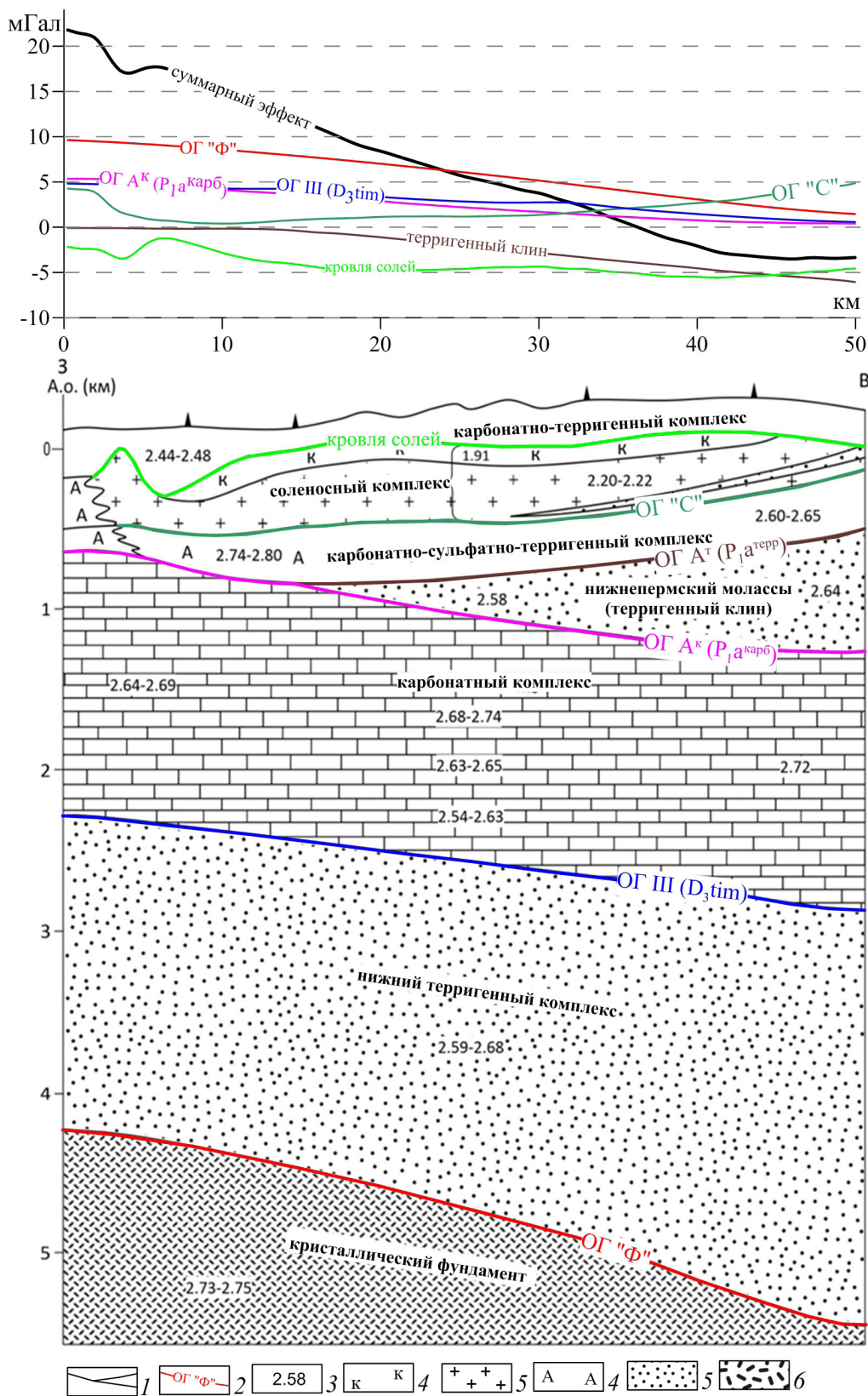


Рис. 2. Геологический разрез: 1 — литолого-стратиграфические границы породных комплексов; 2 — основные гравиактивные границы и их эффект в суммарном поле; 3 — плотность пород; 4 — калийная соль; 5 — каменная соль; 6 — ангидриты, прослои ангидритов; 7 — терригенные (глинисто-обломочные) породы; 8 — гнейсы, граниты, гранито-гнейсы кристаллического фундамента.

Fig. 2. Geological section: 1 — lithological-stratigraphic boundaries of rock complexes; 2 — main gravity boundaries and their effect in the total field; 3 — rock density; 4 — potassium salt; 5 — rock salt; 6 — anhydrites, anhydrite interlayers; 7 — terrigenous (clayey-clastic) rocks; 8 — gneisses, granites, granite-gneisses of the crystalline basement.

Породы нижнепермского терригенного клина и вышележащих кунгурских толщ, накопление которых происходило в предгорных условиях в период горообразовательных и эрозионно-денудационных процессов на Урале, в направлении на запад все менее обогащены обломочным материалом, который преобладает в восточных разрезах. Это изменение содержания терригенной фракции в породах влечет и изменение их плотности, что оказывает влияние на гравитационное поле.

Вся толща осадочного чехла Соликамской впадины по преобладающему литологическому типу пород делится на ряд литолого-стратиграфических комплексов, показанных на сводном геологическом разрезе (рис. 2). Поверхности комплексов являются гравиактивными границами. Согласно работам (Новоселицкий и др., 1985; Физические свойства..., 1984) в Соликамской впадине плотность карбонатных пород изменяется от 2.60 до 2.75 г/см³, плотность терригенных и глинистых — от 2.40 до 2.70 г/см³, плотность соляных разностей — от 1.60 до 2.20 г/см³, ангидритов — до 2.80 г/см³.

По результатам гравитационного моделирования (рис. 2) общее погружение поверхности фундамента и нижних слоев осадочного чехла, а также нижнепермский терригенный клин создают общее уменьшение значений гравитационного поля на восток примерно на 25 мГал.

Соляная толща создает локальные гравитационные аномалии разного знака амплитудой до нескольких мГал. Для соленосного комплекса, толщи каменных и калийных солей лунежского горизонта кунгурского яруса, характерны изменчивость мощности соляных пластов: от выклинивания на западном и восточном бортах Соликамской впадины до 500–550 м в центральной части. На востоке впадины соляная толща расщепляется на отдельные соляные прослои, которые ближе к Уралу замещаются обломочными породами.

По латерали соляное тело имеет неоднородный породный состав: залегающие в нижней части каменные соли (галит) распространены на значительно большей территории чем верхние калийные (сильвинит, карналлит). Калийная линза занимает только центральную часть впадины (см. рис. 1б).

Соляные породы характеризуются существенно низкой плотностью по сравнению с другими литологическими разностями. Плотность каменной соли 2.20–2.22 г/см³, калийных солей в среднем составляет 1.91 г/см³ (Новоселицкий и др., 1985). Кровля и подошва соляного тела являются интенсивными гравиактивными границами. Величина положительной аномальной плотности на подошве соляной линзы составляет 0.30–0.40 г/см³. Гравиактивная граница, при-

уроченная к кровле соли, имеет отрицательный скачок плотности $-0.24 - -0.57$ г/см³. При близком залегании к земной поверхности (кровля располагается на глубине 100–500 м) соляное тело вносит в формирование гравитационного поля существенный вклад. Модельные расчеты показывают, что соляная линза понижает гравитационное поле в Соликамской впадине на величину 4–5 мГал. Отдельными положительными и отрицательными локальными аномалиями размерами до 5–7 км выделяются купола и прогибы кровли солей.

Заключая краткое описание осадочного чехла Соликамской впадины необходимо отметить, что внутри его имеют место различного рода структурные и литологические неоднородности, также участвующие в формировании гравитационного поля, наряду с описанными гравиактивными поверхностями, разделяющими литологические комплексы. К ним относятся тектонические складки различного генезиса на различных стратиграфических уровнях. В девонско-каменноугольной части геологического разреза присутствуют многочисленные гравитирующие объекты:

- органогенно-карбонатные массивы и ассоциированные с ними впадины, заполненные карбонатно-глинистыми породами;
- структуры облекания этих рифогенных массивов, выраженные в виде поднятий до подошвы соляной толщи;
- рифогенные тела в нижнепермских отложениях;
- в галогенной толще сформированы бескорневые соляные поднятия, образованные за счет галокинетических перемещений соляных масс;
- в надсоляных слоях наблюдаются складки облекающие соляные поднятия;
- в центральной части Соликамской впадины в кровле соляной толщи сформированы врезы — так называемые Дуринские и Боровицкие прогибы, заполненные глинистыми и терригенными породами высокой по сравнению с солью плотностью.

Сложная пространственная конструкция из перечисленных неоднородностей в осадочном чехле Соликамской впадины влияет на формирование гравитационного поля, как и генеральная морфология толщ разной плотности.

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

Учитывая, что соли имеют аномально низкую плотность, гравиразведка успешно применяется для изучения месторождений солей, начиная с первых работ в Соликамской (Алексеев, 2012)

и Прикаспийской (Матусевич, 2013) впадинах в 1920–1930-х гг.

С конца 1950-х гг., с появлением высокопроизводительных кварцевых гравиметров, начаты планомерные гравиметрические исследования Соликамской впадины и прежде всего Верхнекамского месторождения солей (Бычков и др., 2006). В 1986–1990 гг. Баженовской геофизической и Пермской геологоразведочной экспедициями составлена кондиционная гравиметрическая карта масштаба 1:25 000 центральной части месторождения. По результатам этих съемок были построены карты поверхности солей, уточнены контуры крупных структур соленосной толщи, протрассированы борта Дуринского и Боровицкого прогибов и возможные разрывные нарушения в осадочном чехле, выявлены рифогенные массивы в подсолевых отложениях, а также участки возможного развития ослабленных зон.

В 1990–1995 гг. гравиметрическими партиями ФГУП «Пермрудгеофизика» выполнены съемки на севере, востоке и юге ВКМКС масштаба 1:50 000. С 2000 г. гравиметрическими съемками Горного института УрО РАН полностью покрыта вся территория месторождения масштабов 1:25 000 и 1:50 000 (Бычков, 2025). Кроме того, на многих участках месторождения проведены детальные гравиметрические исследования масштабов 1:10 000 и 1:5 000 (Бычков и др., 2023) в комплексе геофизических методов (Ярославцев и др., 2025).

Крупномасштабные гравиметрические работы проводились с целью выявления разуплотненных зон в надсоляной и соляной толщах, мониторинговые наблюдения для изучения пространственного распределения плотности горных пород и наблюдения за динамикой их развития, а также контроль оседаний земной поверхности, обусловленный ведением горных работ по добыче калийных солей (Барях и др., 2013).

Обобщение и увязка гравиметрических работ разных лет позволили построить сводную карту аномалий силы тяжести в редукции Буге (плотность промежуточного слоя 2.30 г/см³) для центральной части Соликамской впадины. По периферии месторождения карта, построенная по результатам крупномасштабных съемок, дополнена гравиметрическими данными масштаба 1:200 000 (рис. 3).

Общий диапазон изменения гравитационного поля составляет более 30 мГал. Наблюдается отчетливое уменьшение значений поля в восточном направлении. Средний градиент изменения примерно 0.5 мГал/км. Данное уменьшение объясняется, как было показано выше результатами гравитационного моделирования, погружением поверхности кристаллического фундамента,

сложенного более плотными породами относительно отложений осадочного чехла.

Кроме перечисленных особенностей геологического разреза уменьшение значений поля на восток обусловлено следующими особенностями литологического и геометрического характера геологического разреза: увеличением на восток мощности терригенного комплекса на 800–1000 м, обладающего при этом пониженной плотностью; погружением в восточном направлении палеозойского карбонатного литолого-

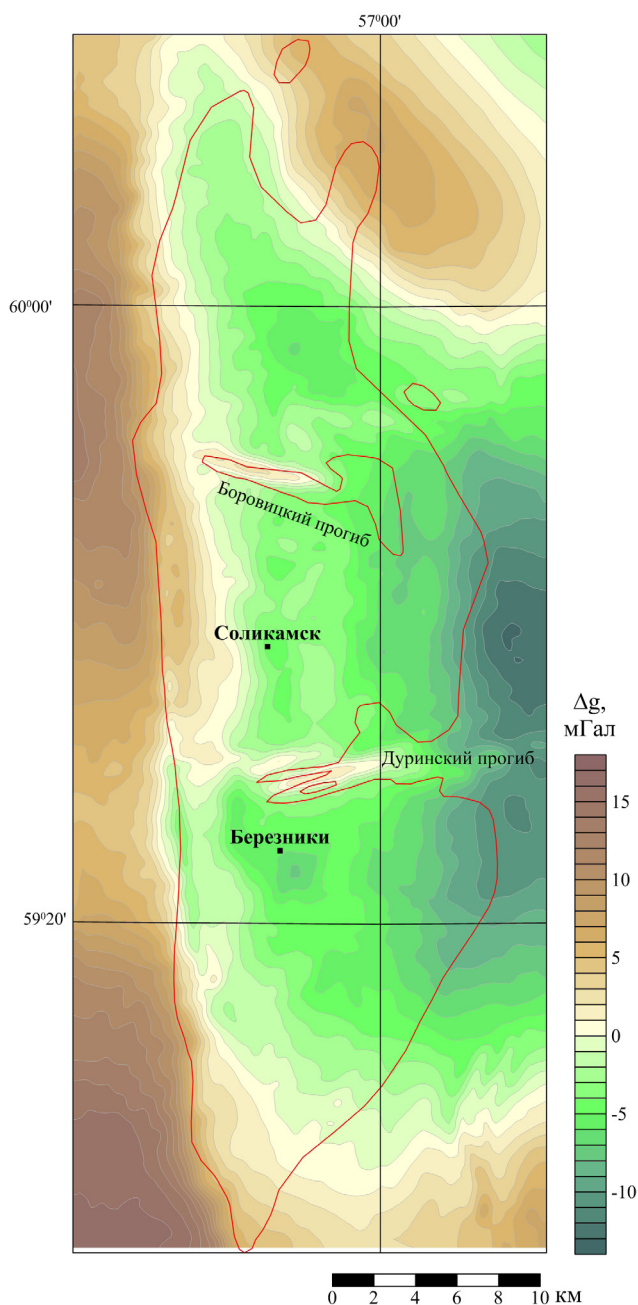


Рис. 3. Гравитационное поле центральной части Соликамской депрессии (уровень условный). Красной линией показан контур калийной залежи.

Fig. 3. Gravitational field of the central part of the Solikamsk depression (conditional level). The red line shows the contour of the potash deposit.

стратиграфического комплекса высокой плотности; изменением литологического состава в структурно-фациальных зонах кунгурского яруса от платформы к Уралу от карбонатно-сульфатного и сульфатно-карбонатного типа разреза до глинисто-сульфатно-галогенного в приосевой части впадины и сульфатно-терригенного на восточном борту Предуральяского прогиба, где повышение роли в разрезе глинистых и обломочных разностей определило пониженную плотность кунгурских отложений.

В гравитационном поле отчетливо проявляется западная граница соляной толщи, где происходит выклинивание мощной пачки соляных пород (Кудряшов, 2000) со средней плотностью 2.10 г/см^3 и замещением их в западном направлении сульфатно-карбонатными породами с плотностью $2.50\text{--}2.80 \text{ г/см}^3$. На востоке месторождения выклинивание солей происходит более плавно, поэтому граница залежи в поле визуально не наблюдается.

После снятия линейного регионального фона в локальных аномалиях гравитационного поля отчетливо выделяется как само месторождение солей, так и отдельные структурные элементы соляной залежи (рис. 4).

Сочленение Восточно-Европейской платформы и Предуральяского прогиба отмечается крутой узкой (шириной $4\text{--}7 \text{ км}$) гравитационной ступенью амплитудой в $6\text{--}7 \text{ мГал}$, которая в меридиональном направлении распространяется по всей описываемой территории. В средней части площади с востока к ступени примыкает узкая (шириной $1.5\text{--}2.5 \text{ км}$) отрицательная аномалия 7, соответствующая наиболее ярко проявляющейся части Камско-Вишерского соляного вала, который сформировался под влиянием «скупивания» соляных масс перед жестким препятствием края платформы в результате геодинамического воздействия Урала (Щербинина, Простолупов, 2018). Положительная аномалия 8 шириной $3\text{--}4 \text{ км}$, амплитудой $1\text{--}2 \text{ мГал}$ отражает наличие Камского прогиба в кровле соляной толщи, который примыкает с востока к Камско-Вишерскому соляному валу. Соляной вал (аномалия 7) и Камский прогиб (аномалия 8) представляют парагенез взаимобусловленных структур.

На карте локальной составляющей гравитационного поля резко выделяются две серии положительных аномалий поперечных Уралу. Это аномалии от Дуринской (аномалия «Д») и Боровицкой (аномалия «Б») систем впадин в кровле соляной толщи. Длина серий аномалий $33\text{--}35 \text{ км}$. Впадины имеют эрозионно-тектоническое происхождение. Они заполнены породами глинисто-терригенного состава высокой, по сравнению с солью, плотности. Впадины, сформированные

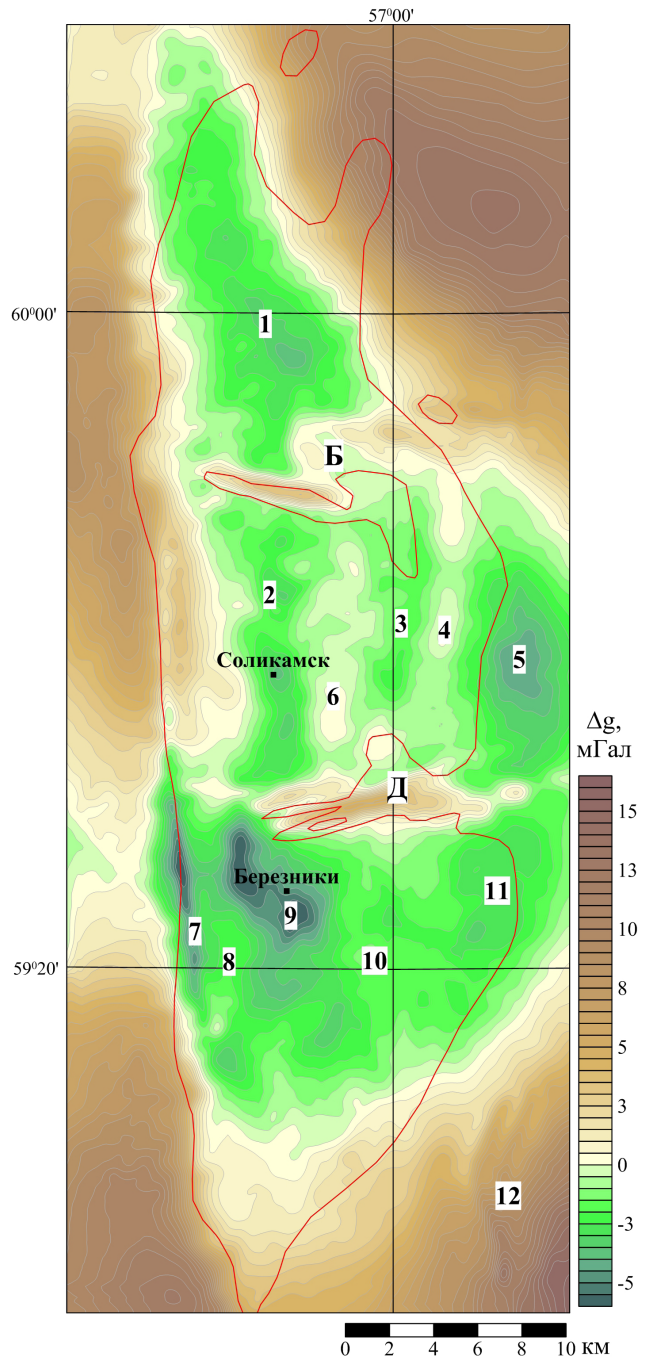


Рис. 4. Карта локальных аномалий силы тяжести (буквами «Б» и «Д» обозначены соответственно аномалии Боровицкой и Дуринской систем впадин; цифрами 4, 6, 8, 10 — положительные аномалии, обусловленные впадинами кровли солей; 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11 — отрицательные аномалии, обусловленные поднятиями; 12 — зона линейных аномалий). Красной линией показан контур калийной залежи.

Fig. 4. Map of local gravity anomalies (the letters «Б» and «Д» respectively designate the anomalies of the Borovitskaya and Durinskaya systems of depressions; the numbers 4, 6, 8, 10 are positive anomalies caused by depressions in the salt roof; 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11 are negative anomalies caused by uplifts; 12 is the zone of linear anomalies). The red line shows the contour of the potash deposit.

в кровле соляного комплекса, являются важным показателем нарушенности осадочного чехла и кристаллического фундамента Предуральяского прогиба. Данные системы нарушений определяются как глубинные разломы и относятся к правому и левому горизонтальным сдвигам кристаллического фундамента (Казанцева, 1987; Чайковский, 2008; Щербинина, 1999). Глубинные сдвиги фундамента в кровле соляного комплекса проявились в виде кулис из отдельных впадин. В галогенной толще структуры разрушения подвергались растворению и выщелачиванию соляных пород с последующим заполнением образовавшихся впадин тяжелыми породами (Щербинина, 1999).

Судя по характеру гравитационного поля, Боровицкий прогиб имеет более сложное строение, чем это показано на общепринятых схемах кровли солей (Кудряшов, 2001). Цепочка положительных локальных аномалий силы тяжести прослеживается к северо-востоку от него. Положительные аномалии Дуринского прогиба простираются дальше на запад и восток от границ соляной толщи.

Серии Дуринских и Боровицких впадин делят пространство Соликамской депрессии на три части — северную, среднюю, южную. Каждая часть характеризуется своими особенностями гравитационного поля, очевидно, обусловленными разным строением осадочного чехла.

В северном сегменте рассматриваемой территории аномальное гравитационное поле имеет более простое строение, относительно средней и южной частей впадины. В центральной части северного сегмента в субмеридиональном направлении протягивается единая обширная отрицательная аномалия 1. Амплитуда ее в северной ее части составляет 4–6 мГал, в южной — 10 мГал.

Средний участок, расположенный между Дуринскими и Боровицкими впадинами, характеризуется наличием вытянутых в меридиональном направлении положительных (4, 6) и отрицательных (2, 3) аномалий поля, отражающих его волнообразную форму. Ширина аномалий около 5 км, при длине 23–25 км. В геологическом строении аномалии соответствуют впадинам и валам, сформированным в кровле соляного комплекса, т.е. данные гравитационные аномалии формируются неровностями кровли соляной толщи. Основной причиной образования волнообразной формы кровли соли, очевидно, являлся режим горизонтального сжатия, распространяющийся от Уральского орогена в западном направлении (Казанцева, 1987; Камалетдинов, 1974; Щербинина, Простолупов, 2018).

Отрицательная аномалия 2 соответствует меридионально вытянутому Соликамскому

поднятию (валу), включающему три соляных купола: Поповский, Рудничный и Клестовский (Кудряшов, 2001). Отрицательная аномалия 3 отражает наличие Харюшинского поднятия, включающего также три соляных купола.

Положительная аномалия 6 имеет длину около 22 км, ширину 7–8 км, амплитуда ее около 2 мГал. Данная аномалия обусловлена наличием в кровле соляного комплекса Тверитинской мульды — впадины амплитудой 130 м. Положительная аномалия 4 соответствует Осокинскому прогибу (Кудряшов, 2001) глубиной 70 м, осложняющему кровлю соляной толщи. Ширина аномалии около 5 км, амплитуда 2–2.5 мГал.

Восточнее аномалий 2, 6, 3, 4, формирующих волнообразный тренд на карте гравитационного поля, выявляется обширная отрицательная аномалия 5 почти изометричной формы, которая характеризуется наиболее низкими значениями поля на рассматриваемой территории. Амплитуда аномалии около 4 мГал. Это понижение гравитационного поля на востоке территории соответствует структурному понижению поверхности кристаллического фундамента и углубленному залеганию плотных карбонатных толщ палеозоя, а также большой мощности легких терригенных молассовых пород.

К югу от Дуринских аномалий отчетливо видна положительная аномалия гравитационного поля 10, создаваемая Дурыманской впадиной в кровле соляной толщи (Кудряшов, 2001). Простирается аномалия в северной ее части, соответственно и впадины в кровле соли, меридиональные, а затем юго-западные. Дурыманская впадина в кровле соляной толщи имеет ширину от 4 до 8 км, амплитуду 60–80 м. Данная аномалия в разных частях впадины в зависимости от ее глубины и ширины характеризуется амплитудой от 0.7 мГал до 1.2 мГал, шириной от 5.5 км до 9.5 км.

Интенсивная отрицательная аномалия 9, наблюдаемая к западу от северной части Дурыманской впадины, отражает наличие в кровле соляной толщи Березниковского соляного купола. Амплитуда его около 100 м, горизонтальные размеры 7–8 км. В морфологии гравитационного поля соляной купол таких размеров создает отрицательную аномалию амплитудой 2.2 мГал, диаметром около 10 км.

Обширная отрицательная аномалия 11, наблюдаемая на востоке южного сегмента, может быть объяснена теми же причинами, что и аномалия 5, а также близким расположением к земной поверхности (до абсолютных отметок +50 м) отрицательной гравиактивной границы, приуроченной к кровле соляной толщи.

На самом юго-востоке рассматриваемой территории в гравитационном поле Соликамской впадины зафиксирована двойная аномалия 12

дугообразной формы субмеридионального простираения. Этот ансамбль положительных и отрицательных линейных аномалий указывает на наличие в осадочном чехле тектонических деформаций. Ширина аномалий 1.5–2 км, амплитуда 1–15 мГал. Судя по незначительной ширине аномалий, формирующие их тектонические структуры находятся на небольшой глубине. Приближенная позиция аномалий к передовым уральским надвигам позволяет предположить, что они отражают тектонические деформации дизъюнктивного характера (Щербинина, 2002) или линзы выклинивания солей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почти за столетнюю историю гравиметрических исследований различными геофизическими организациями практически вся территория Соликамской впадины Предуралья краевого прогиба закрыта крупномасштабными полевыми съемками, что позволило создать сводную гравиметрическую карту и выделить на ней основные гравитирующие геологические объекты, которые можно условно разделить на три иерархических уровня.

В первую очередь — это погружение поверхности кристаллического фундамента и нижней плотной части осадочного чехла в восточном направлении под Уральские структуры. Второй фактор — наличие нижнепермского терригенного клина пониженной плотности и увеличение в восточном направлении его мощности, а также повышенное содержание на востоке прогиба обломочных пород низкой плотности в разрезах кунгурского яруса. Третий фактор, имеющий также большое значение в формировании общей картины гравитационного поля, является наличие в верх-ней части осадочного чехла соляной линзы. Это факторы литологического характера.

Структурные (тектонические) факторы, формирующие морфологию гравитационного поля следующие. Во-первых, граница Восточно-Европейской платформы и Предуралья прогиба, простирающаяся в меридиональном направлении через всю рассматриваемую территорию. Четкое проявление границы в виде гравитационной ступени обусловлено контактом кунгурских сульфатов и карбонатов платформы с соляными породами прогиба.

Другим тектоническим фактором, отражающимся в поле силы тяжести, являются впадины Дуринской и Боровицкой систем, образовавшиеся в кровле соляной толщи над глубинными разломами фундамента и заполненные терригенными породами. К структурному фактору формирования, наблюдаемых визуально аномалий гравитационного поля, относится и наличие

положительных и отрицательных структур (валов и впадин) в кровле соляной толщи, которые явно "просвечивают" в поле силы.

Таким образом, гравитационное поле Соликамской впадины формируют как литологические, так и структурные неоднородности, наиболее значительные из которых опознаются в его морфологии. Деление факторов на литологические и структурные условно, т.к. часто они являются проявлением одного и того же объекта в гравитационном поле. Суперпозиция гравитационных эффектов различных источников отражает строение геологической среды, ее сложную пространственную конструкцию.

Кроме геологических структур, выделяемых в наблюдаемом поле силы тяжести описанных выше, т.е. структур, имеющих значительные гравитационные эффекты, проявляющиеся в морфологии поля, внутри геологических толщ находятся неоднородности, влияние которых на фоне аномалий от соляной толщи визуально не наблюдается. Это франско-турнейские рифогенные массивы и структуры их обложения. Рифогенные массивы с синхронными им депрессионными отложениями представляют внутриформационный комплекс, заключенный в толще палеозойских карбонатов. Комплекс имеет изменяющуюся мощность от 300 м в межрифовых пространствах до 500 м в пределах рифовых массивов. Глубина кровли данного рифовмещающего комплекса увеличивается от 1900 м на западе описываемой территории до 2500 м на востоке Соликамской впадины. И хотя рифогенные массивы создают положительные гравитационные эффекты до 1–2 мГал (Щербинина, 2020) в наземном поле они визуально не идентифицируются без детального разделения суммарного поля на составляющие (Новоселицкий, Простолупов, 1999).

Не проявляются визуально в поле и эффекты от нижнепермских рифов в силу своих небольших горизонтальных и вертикальных размеров.

Скрыты от визуального наблюдения в морфологии гравитационного поля также локальные неоднородности гравитационных поверхностей внутри осадочного чехла — тектонические структуры разной природы, а также небольшие объекты с отличающейся от окружающего пространства плотностью.

Количественная интерпретация гравитационных аномалий Соликамской впадины, разделение поля на составляющие, исключение влияния солей позволят выявить новые гравитирующие объекты и уточнить глубинное строение впадины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (регистрационный номер НИОКТР 1022040500598-4-1.5.6).

Список литературы [References]

- Алексеев С.И.* Результаты гравитационных наблюдений в Соликамском районе // Труды I Всесоюзной геофизической конференции (с комментариями) / Отв. за переиздание В.И.Костицын. Пермь: ПГНИУ. 2012. С. 230–234 [*Alekseev S.I.* Results of gravitational observations in the Solikamsk region // Proceedings of the 1st All-Union Geophysical Conference (with comments) / Responsible for the republication V.I. Kostitsyn. Perm: Perm State National Research University. 2012. P. 230–234 (in Russian)].
- Барях А.А., Санфиоров И.А., Дягилев Р.А.* Мониторинг последствий затопления калийного рудника // Горный журн. 2013. № 6. С. 34–39 [*Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Dyagilev R.A.* Monitoring the consequences of flooding of a potash mine // Mining Journal. 2013. № 6. P. 34–39 (in Russian)].
- Белоконов Т.В., Горбачев В.И., Балашова М.М.* Структура и нефтегазоносность рифейско-вендских отложений востока Русской платформы. Пермь: ИПК «Звезда», 2001. 108 с [*Belokon T.V., Gorbachev V.I., Balashova M.M.* Structure and oil and gas potential of the Riphean-Vendian deposits in the east of the Russian platform. Perm: IPK «Zvezda», 2001. 108 p. (in Russian)].
- Бычков С.Г.* Гравиметрическая изученность Верхнекамского месторождения солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 2025. ГИ УрО РАН. С. 58–62 [*Bychkov S.G.* Gravimetric study of the Verkh-nekamskoye salt deposit // Theoretical and Practical Issues of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. 2025. GI UB RAS. P. 58–62 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Неганов В.М.* Новая тектоническая схема территории Пермского края // Горное эхо. 2010. № 3. С. 37–42 [*Bychkov S.G., Neganov V.M.* New tectonic scheme of the Perm region // Mining Echo. 2010. № 3. P. 37–42 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Неганов В.М., Нояксова Л.Д.* Геофизическая изученность // Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края. Энциклопедия / Пермь: Администрация Пермского края. 2006. С. 41–49 [*Bychkov S.G., Neganov V.M., Noyaksova L.D.* Geophysical study // Mineral resources of Perm Krai. Encyclopedia / Perm: Administration of Perm Krai. 2006. P. 41–49 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Симанов А.А. и др.* Выявление природных и техногенных разуплотненных зон в подработанном массиве по данным высокоточных гравиметрических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 2. Вып. 58. С. 101–114 [*Bychkov S.G., Prostolupov G.V., Simanov A.A. et al.* Identification of natural and manmade decompressed zones in an underworked massif based on high-precision gravimetric observations // Bulletin of the KRAUNTs. Earth Sciences. 2023. № 2 (58). P. 101–114 (in Russian)]. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-101-114>
- Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П.* Гравиметрические исследования нефтеперспективных объектов Камско-Кинельской системы прогибов // Нефть. Газ. Новации. 2009. №4. С. 6–11 [*Bychkov S.G., Prostolupov G.V., Shcherbinina G.P.* Gravimetric studies of oil-promising objects of the Kama-Kinel trough system // Oil. Gas. Innovations. 2009. № 4. P. 6–11 (in Russian)].
- Грунис Е.Б., Ростовщиков В.Б., Сбитнева Я.С. и др.* Новые представления о строении Предуральского краевого прогиба в связи с нефтегазоносностью // Геология нефти и газа. 2021. № 1. С. 7–18 [*Grunis E.B., Rostovshchikov V.B., Sbitneva Ya.S. et al.* New ideas about the structure of the Pre-Ural marginal trough in connection with oil and gas potential // Geology of oil and gas. 2021. № 1. P. 7–18. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-1-7-18> (in Russian)].
- Казанцева Т.Т.* Аллохтонные структуры и формирование земной коры Урала. М.: Наука, 1987. 158 с. [*Kazantseva T.T.* Allochthonous structures and formation of the Ural earth's crust. Moscow: Nauka, 1987. 158 p. (in Russian)].
- Казанцева Т.Т.* К перспективам нефтегазоносности Предуральского прогиба // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2014. № 20. С. 8–20 [*Kazantseva T.T.* On the Prospects of Oil and Gas Potential of the Pre-Ural Trough // Geology. News of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus. 2014. № 20. P. 8–20 (in Russian)].
- Камалетдинов М.А.* Покровные структуры Урала. М.: Наука, 1974, 228 с. [*Kamaletdinov M.A.* Cover structures of the Urals. Moscow: Nauka, 1974, 228 p. (in Russian)].
- Кассин Г.Г., Филатов В.В.* Динамика Дуринского прогиба по гравиметрическим данным // Геофизические работы при региональных и геологосъемочных исследованиях на Урале. Свердловск, 1989. С. 28–34 [*Kassin G.G., Filatov V.V.* Dynamics of the Durinsky trough based on gravity data // Geophysical work in regional and geological survey studies in the Urals. Sverdlovsk, 1989. P. 28–34 (in Russian)].
- Кудряшов А.И.* Верхнекамское месторождение солей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с [*Kudryashov A.I.* Verkhnekamskoe salt deposit. Perm: GI UB RAS, 2001. 429 p. (in Russian)].
- Масагутов Р.Х., Киселев В.В., Хакимова С.В.* Типы месторождений углеводородов в южной части Предуральского прогиба // Геология нефти и газа. 2021. № 4. С. 59–66 [*Masagutov R.Kh., Kiselev V.V., Khakimova S.V.* Types of hydrocarbon deposits in the southern part of the Pre-Ural trough // Geology of oil and gas. 2021. № 4. P. 59–66. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-4-59-66> (in Russian)].
- Матусевич А.В.* Гравиразведка Прикаспийской впадины. Ливны: Издатель Мухаметов Г.В. 2013. 176 с [*Matusevich A.V.* Gravity exploration of the Caspian depression. Livny: Publisher Mukhametov G.V. 2013. 176 p. (in Russian)].
- Неганов В.М., Заварзин Б.А., Зотеев М.С. и др.* Особенности геологического строения Предуральского краевого прогиба // Геофизика. 2000. № S. С. 29–33 [*Neganov V.M., Zavarzin B.A., Zoteev M.S. et al.* Features of the geological structure of the Pre-Ural marginal trough // Geophysics. 2000. № S. P. 29–33 (in Russian)].

- Новоселицкий В. М., Проворов В. М., Шилова А. А.* Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 134 с. [*Novoselitsky V.M., Provorov V.M., Shilova A.A.* Physical properties of rocks of the sedimentary cover of the northern Ural-Volga region. Sverdlovsk: UC USSR Academy of Sciences, 1985. 134 p. (in Russian)].
- Новоселицкий В. М., Простолупов Г. В.* Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения локализации источников аномалий // Геофизика и математика. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 104–107 [*Novoselitsky V.M., Prostolupov G.V.* Vector processing of gravimetric observations for the purpose of detecting the localization of anomaly sources // Geophysics and Mathematics. Moscow: OIPhZ RAS, 1999. P. 104–107 (in Russian)].
- Пушаровский Ю. М.* Краевые прогибы, их тектоническое строение и развитие. Труды Геологического института АН СССР. Выпуск 28. М., 1959. 155 с. [*Pushcharovsky Yu.M.* Marginal depressions, their tectonic structure and development. Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences. Issue 28. Moscow, 1959. 155 p. (in Russian)].
- Ступакова А. В.* Тимано-Печорский бассейн. Строение и основные этапы развития // Георесурсы. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 56–64 [*Stupakova A.V.* Timan-Pechora basin. Structure and main stages of development // Georesources. 2017. Special issue. Part 1. P. 56–64 (in Russian)]. <https://doi.org/10.18599/grs.19.7>
- Трапезников Д. Е.* Галогенные отложения уфимского яруса в пределах Соликамской впадины // Литосфера. 2018. Т. 18. № 2. С. 223–234 [*Trapeznikov D.E.* Halogen deposits of the Ufa stage within the Solikamsk depression // Lithosphere. 2018. Vol. 18. № 2. P. 223–234. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-2-223-234> (in Russian)].
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика). Справочник геофизика / Под ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984, 455 с. [Physical properties of rocks and minerals (Petrophysics). Geophysics handbook / Ed. N. B. Dortman. Moscow: Nedra, 1984, 455 p. (in Russian)].
- Хаин В. Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с. [*Khain V.E.* Tectonics of continents and oceans (2000). Moscow: Scientific World, 2001. 606 p. (in Russian)].
- Чадаев М. С., Ибламинов Р. Г., Гершанок Л. А. и др.* Геологические структуры западного склона северного и среднего Урала по данным гравиметрии и магнитометрии // Литосфера. 2011. № 6. С. 134–140 [*Chadayev M.S., Iblaminov R.G., Gershanok L.A. et al.* Geological structures of the western slope of the northern and middle Urals according to gravimetry and magnetometry data // Lithosphere. 2011. № 6. P. 134–140 (in Russian)].
- Чайковский И. И.* Основные этапы формирования тектонических нарушений в водозащитной толще Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2008. № 10. С. 41–44. [*Tchaikovskiy I.I.* The main stages of formation of tectonic disturbances in the water-protective layer of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit // Mining magazine. 2008. № 10. P. 41–44 (in Russian)].
- Щербинина Г. П.* Проявление франско-турнейских рифогенных массивов в плотностном строении верхней части разреза Соликамской впадины // Горное эхо, 2020, №3 (80). С. 98–100 [*Shcherbinina G.P.* Manifestation of the Frasnian-Tournaisian reef massifs in the density structure of the upper part of the Solikamsk depression section // Gornoe Echo, 2020, № 3 (80). P. 98–100 (in Russian)].
- Щербинина Г. П.* Процессы, сформировавшие Дуринскую систему впадин // Проблемы безопасности и совершенствования горных работ. Пермь: ГИ УрО РАН, 1999. С. 251–252 [*Shcherbinina G.P.* Processes that formed the Durinskaya system of depressions // Problems of safety and improvement of mining operations. Perm: GI UB RAS, 1999. P. 251–252 (in Russian)].
- Щербинина Г. П.* Проявление палеогеодинамики в гравитационном поле на востоке Предуральского прогиба // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых. Пермь: ГИ УрО РАН. 2002. С. 74–77 [*Shcherbinina G.P.* Manifestation of paleo-geodynamics in the gravitational field in the east of the Pre-Ural trough // Problems of complex monitoring at mineral deposits. Perm: GI UB RAS. 2002. P. 74–77 (in Russian)].
- Щербинина Г. П., Простолупов Г. В.* Тектоника области сочленения Восточно-Европейской платформы и Соликамской депрессии Предуральского прогиба // Вестник Пермского университета. Геология. 2018. Том 17, № 3. С. 200–207 [*Shcherbinina G.P., Prostolupov G.V.* Tectonics of the junction area of the East European platform and the Solikamsk depression of the Cis-Ural trough // Bulletin of Perm University. Geology. 2018. Vol. 17, № 3. P. 200–207 (in Russian)].
- Ярославцев А. Г., Степанов Ю. И., Бычков С. Г.* Современная геофизика соляных рудников // Вестник АГГИ. 2025. № 1. С. 9–10 [*Yaroslavtsev A.G., Stepanov Yu.I., Bychkov S.G.* Modern geophysics of salt mines // Bulletin of AGGI. 2025. № 1. P. 9–10 (in Russian)]. URL: <https://agge-vestnik.ru/ru/nauka/article/95344/view> (дата обращения: 19.03.2025).

ГРАВИТИРУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ
**GRAVITATING OBJECTS OF THE SOLIKAMSK
DEPRESSION OF THE PRE-URAL FOREDEEP**

S.G. Bychkov, G.P. Shcherbinina, G.V. Prostolupov

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, 614007

Received April 02, 2024; revised May 27, 2025; accepted June 25, 2025

Over almost a century of gravimetric studies by various geophysical organizations, almost the entire territory of the Solikamsk Depression of the Pre-Ural Foredeep has been covered by large-scale field surveys, which made it possible to create a consolidated gravimetric map and identify the main gravitation geological objects in it. The general subsidence of the basement surface and lower layers of the sedimentary cover, as well as the Lower Permian terrigenous wedge, create a general decrease in the gravity field values mGal to the east by approximately 30 mGal. The salt mass of the Verkhnekamskoye deposit creates local gravity anomalies of different signs with an amplitude of up to several mGal. The series of Durinsky and Borovitsky depressions in the roof of the salt deposit divide the Solikamsk depression into three parts — northern, middle, and southern. Each part is characterized by its own features of the gravity field due to the different structure of the sedimentary cover. The conducted qualitative analysis of gravity anomalies made it possible to clarify the deep structure of the Solikamsk depression and to identify the degree of influence of various geological objects on the formation of the gravity field of the territory.

Keywords: Pre-Ural foredeep, Solikamsk depression, salts, gravity anomalies.