УДК 551.24+550.83 DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-96-106

Картирование структурно-тектонических объектов Верхнекамского месторождения калийных солей в магнитном поле

Филатов В. В.[1], Болотнова Л. А.[2]*
[1] Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия
[2] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: l.bolotnova@yandex.ru

Реферат

Введение. *Длительная история образования и развития Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) (около 300 млн лет) и разнообразные эндогенные и экзогенные геолого-геохимические процессы запечатлены в петрофизических свойствах его горных пород и толщ. Геологическое строение ВКМКС, а также происходившие и происходящие на месторождении процессы эффективно изучаются геофизическими методами. Наиболее результативными в геологическом отношении, при гигантских размерах площадей развития соляной толщи и многопластовой залежи калийно-магниевых солей, как показала практика, являются высокоточные и детальные геофизические исследования, выполненные на большей части территории ВКМКС, а именно: гравиразведка масштаба 1 : 25 000 и аэромагниторазведка масштаба 1 : 10 000 в совокупности с результатами других геолого-геофизических исследований. Петрофизической основой применения аэромагниторазведки для картирования структурно-тектонических объектов ВКМКС служат не только условия залегания объектов, но и магнитные свойства его горных пород и толщ, главным образом такое их свойство, как магнитная восприимчивость. Задача картирования структурно-тектонических объектов на территории ВКМКС в магнитном поле является частной задачей применения аэромагниторазведки для картирования структурно-тектонических объектов в слабомагнитном осадочном чехле вообще всего Пермского Приуралья.*

Методика исследований. *Изучение и анализ результатов исследований магнитных свойств (магнитной восприимчивости) пород осадочного чехла Пермского Приуралья. Изучение и анализ морфологии аномалий магнитного поля структурно-тектонических объектов в осадочном чехле Пермского Приуралья. Изучение и анализ морфологии аномалий магнитного поля структурно-тектонических объектов на ВКМКС.*

Результаты исследований. *Анализ магнитной восприимчивости пород осадочного чехла и интерпретация данных аэромагнитной съемки показали, что структурно-тектонические объекты чехла создают аномалии в магнитном поле, превышающие по интенсивности утроенную среднеквадратическую погрешность измерения, и поэтому уверенно картируются.*

Выводы. *Данные площадной высокоточной аэромагнитной съемки масштаба 1 : 10 000 целесообразно использовать в комплексе с другими геолого-геофизическими методами для повышения надежности картирования в пределах ВКМКС таких важнейших структурно-тектонических объектов, как тектонические нарушения различных рангов, от глубинных разломов до трещинных зон.*

Ключевые слова: *Пермское Приуралье; Верхнекамское месторождение калийных солей; структурно-тектонические объекты; магнитное поле; магнитная восприимчивость; осадочный чехол.*

Предмет и цель работы. Предметом изучения является магнитное поле Пермского Приуралья и Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), а в качестве источников этого поля рассматриваются магнитоактивные образования,

отождествляемые со структурно-тектоническими объектами геологической среды. Цель статьи заключается в установлении зависимости между аномалиями магнитного поля, выявленными по результатам проведения площадной аэромагнитной съемки, и структурно-тектоническими объектами геологической среды, чтобы, опираясь на эту зависимость, использовать ее в качестве инструмента для изучения геологического строения ВКМКС в комплексе с другими геолого-геофизическими методами, т. е. для картирования в магнитном поле соответствующих структурно-тектонических объектов.

Методика исследований. Во-первых, поскольку магнитная восприимчивость (как и другие магнитные свойства) пород и толщ непосредственно на ВКМКС не изучалась, то для определения возможности использования магниторазведки для картирования структурно-тектонических объектов месторождения были проанализированы данные о магнитной восприимчивости пород и толщ осадочного чехла района Пермского Приуралья и прежде всего района Соликамской впадины. Во-вторых, на основании результатов аэро- и наземных площадных магнитных съемок были установлены морфологические и количественные характеристики аномалий магнитного поля известных в Пермском Приуралье структурно-тектонических объектов в осадочном чехле. В-третьих, данные о магнитной восприимчивости пород и толщ осадочного чехла Пермского Приуралья были проэкстраполированы на породы и толщи, аналогичные по петрографическому составу ВКМКС. В-четвертых, осуществлено картирование структурно-тектонических объектов в магнитном поле на ВКМКС путем сопоставления выявленных на месторождении аномалий с аномалиями известных объектов в Пермском Приуралье.

Результаты работы. Систематические и детальные исследования магнитных свойств осадочных пород Пермского Приуралья начались в середине 1970-х гг. в связи с применением детальных аэромагнитных съемок для картирования и изучения структур платформенного чехла при поиске месторождений углеводородов [1, 2]. В структурно-петрографическом отношении осадочный чехол Пермского Приуралья состоит из пяти комплексов: верхнего терригенного и сульфатно-карбонатного – пермского возраста; нижнего терригенно-карбонатного – девонско-верхнепротерозойского возраста; карбонатно-терригенного – верхнепротерозойского возраста и мезо-кайнозойских отложений, представленных рыхлыми покровными образованиями небольшой мощности (50–60 м), рассматриваемыми как часть верхнего терригенного комплекса.

В петромагнитном отношении осадочный чехол состоит из трех комплексов: нижний, средний и верхний (табл. 1) [3].

Нижний комплекс представлен карбонатно-терригенными осадками преимущественно рифейско-вендского возраста, включая частично верхний девон. Его мощность изменяется от 0 км на западе до 6–8 км в районе Предуральского краевого прогиба. Магнитная восприимчивость варьирует в интервале $4\pi(0–167) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ; интервал изменения средней величины æ уже: $4\pi(8–158) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ.

Средний комплекс, имея повсеместное распространение, сложен карбонатными осадками верхнего девона, карбона и нижней перми. Его мощность изменяется от 0,5 до 1,5–2,0 км. Относительный объем терригенных осадков в этом комплексе невелик. Интервал изменения величины магнитной восприимчивости $4\pi(5–137) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ; среднее значение æ изменяется в интервале $4\pi(15–40) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ.

Верхний комплекс представлен песчано-глинистыми осадками с прослоями сульфатно-галогенных образований от верхней перми до мезо-кайнозоя. Его мощность изменяется от 0 до 1 км в Предуральском краевом прогибе. Породы

комплекса являются наиболее магнитными. Магнитная восприимчивость изменяется в интервале $4\pi(10–350) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ; среднее значение æ изменяется в интервале $4\pi(30–224) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ. Осадочные породы в составе верхнего комплекса, такие как известняки, доломиты, ангидриты, гипсы, соли (галогены), практически немагнитные, за исключением известняков, если они содержат минералы магнитной фракции. Повышенной магнитной восприимчивостью могут характеризоваться как глинистые, так песчаные образования. По данным [4], красноцветные осадки являются более магнитными, чем морские. В центральной части Соликамской впадины магнитная восприимчивость может достигать $4\pi(8–100) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ.

Таблица 1. Магнитная восприимчивость пород осадочных комплексов Пермского Приуралья
Table 1. Magnetic susceptibility of Perm Cis-Urals sedimentary sequence rocks

Комплексы, возраст	Породы	Магнитная восприимчивость, 4π æ $\cdot 10^{-6}$, ед. СИ	
		Предуральский краевой прогиб	Западный склон Урала
Верхний терригенный, $P_2 – KZ$	Песчаники, пески	(37–350) / 260*	(26–157) / 57
	Алевролиты	(28–204) / 105	(9–49) / 33
	Аргиллиты, глины	(17–138) / 70	(4–84) / 30
Средний карбонатный, $D_3 – P_1$	Песчаники, пески	(518) / 10	(15–137) / 39
	Алевролиты	(1–50) / 18	(5–16) / 9
	Аргиллиты, глины	(5–29) / 16	(5–37) / 18
Нижний терригенно-карбонатный, $Pt_3 – D_3$	Песчаники, пески	(20–88) / 54	(15–91) / 53
	Алевролиты	(10–149) / 80	(0–16) / 8
	Аргиллиты, глины	(150–167) / 158	(12–37) / 25

* В числителе указан интервал изменения магнитной восприимчивости ($æ_{макс}–æ_{мин}$), в знаменателе – среднее значение магнитной восприимчивости $æ_{ср}$.

Эпизодическое изучение остаточной намагниченности I_n, выполненное в Предуральском краевом прогибе, свидетельствует о малой величине фактора Кенигсбергера Q ($Q \leq 1$). Между остаточной намагниченностью и магнитной восприимчивостью установлена прямая корреляционная зависимость. Следовательно, определяющее влияние на интенсивность аномалий магнитного поля структурно-тектонических объектов в Пермском Приуралье оказывает магнитная восприимчивость, т. е. только индуктивная намагниченность I.

Аномалии магнитного поля определяются не только величиной магнитной восприимчивости пород, но и закономерностями ее изменения в пределах магнитоактивного объекта, как региональными, так и латеральными:

– в региональном плане геомагнитный разрез чехла представим в виде серии субгоризонтальных слоев (пластов) с различной величиной æ;

– внутри верхнего терригенного комплекса выявлены пласты сильно магнитных пород, имеющие большое плановое распространение;

– средняя намагниченность одновозрастных толщ зависит от тектонической позиции этих толщ;

– в пределах локальных объектов наблюдается латеральная изменчивость магнитной восприимчивости пород; в Пермском Приуралье установлено, что локальные поднятия характеризуются уменьшением магнитной восприимчивости пород от сводовой части к крыльям;

– зональность магнитной восприимчивости обусловлена изменением литолого-фациального состава терригенных осадков по латерали в процессе формирования объекта, когда терригенные осадки в сводовой части объекта полностью замещаются немагнитными карбонатно-сульфатными породами.

Таким образом, из анализа закономерностей изменения магнитной восприимчивости следует, что типичной петромагнитной моделью объектов осадочного чехла Пермского Приуралья и в региональном, и в локальном планах является слоисто-зональная модель объекта, магнитные свойства которого в первом приближении описываются кусочно-линейной функцией.

Анализ результатов аэро- и наземных магнитных съемок (картограмма изученности магнитного поля приведена в [5]), выполненных в Предуральском прогибе до 1986 г., т. е. до аварии на БКРУ-3, показал, что аэромагнитной съемкой масштаба 1 : 10 000 при высоте полета 50 м и точности измерения ±4 нТл уверенно картируются локальными отрицательными и положительными аномалиями структурно-тектонические объекты верхнего терригенного комплекса: валы, локальные поднятия, рифовые постройки, а в зоне передовых складок Урала высокоамплитудные разрывные нарушения и надвиги. Так, аномалиями интенсивностью «минус» 5–15 нТл картируются Ксенофонтовский, Ораловский, Колвинский, Кикусский и другие поднятия; плановые размеры этих аномалий удовлетворительно соответствуют плановым размерам поднятий. Помимо изометричных аномалий картируются положительные линейные аномалии протяженностью 20–40 км интенсивностью 5–15 нТл. Некоторые из них совпадают с известными структурно-тектоническими объектами, например, с Красновишерско-Ныробским надвигом (рис. 1), Гежской антиклинальной структурой, с которой связано Гежское месторождение нефти.

Структурно-тектонические объекты, приуроченные к среднему карбонатному и нижнему терригенно-карбонатному комплексам, хоть и сложены породами повышенной магнитной восприимчивости (табл. 1), но залегают на большой глубине. Поэтому создаваемые ими аномалии характеризуются меньшей интенсивностью по сравнению с интенсивностью аномалий объектов верхнего комплекса. Так, интенсивность теоретической аномалии ΔT изометричной структуры диаметром 2000 м и амплитудой 400 м, залегающей на глубине 2–3 км и характеризующейся магнитной восприимчивостью $4\pi \cdot 200 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ, составляет всего 1–2 нТл, т. е. существенно меньше среднеквадратической погрешности измерения (±4 нТл).

Для физико-геологических условий Соликамской впадины за пределами развития соляно-калийной залежи, где аэромагнитные исследования масштаба 1 : 10 000 были выполнены только в 1987–89 гг. (*Халымбаджа И. Г. Отчет об аэромагнитной съемке масштаба 1 : 10 000 на Верхнекамской площади в 1987–1989 гг. (Аэрогеофизическая партия ПГО «Уралгеология»). Свердловск: Фонд ФГУ Свердловского ТФГИ, 1989*), были сделаны расчеты ожидаемых аномалий *T*. Расчеты показали, что антиклинальные структуры, флексуры, купола в кровле карбонатных осадков, а также узкие прогибы по поверхности немагнитных галогенных осадков, заполненные терригенными отложениями при магнитной восприимчивости, равной 4π (100–200) $\cdot 10^{-6}$ ед. СИ, могут создавать локальные аномалии интенсивностью 7–15 нТл, а при неглубоком залегании структур 20–30 нТл.

Благоприятные результаты применения аэромагнитной съемки для картирования структурно-тектонических объектов в Пермском Приуралье послужили основанием для применения этого метода при картировании структурно-тектонических объектов в пределах развития соляно-калийной залежи ВКМКС

(*Халымбаджа И. Г. Отчет об аэромагнитной съемке…*); обоснования параметров аэромагнитной съемки (масштаб 1 : 10 000, высота полета 50–75 м, среднеквадратическая погрешность измерения $\Delta T_а$ равна ±(2–3) нТл); оценки интенсивности ожидаемых аномалий *T*.

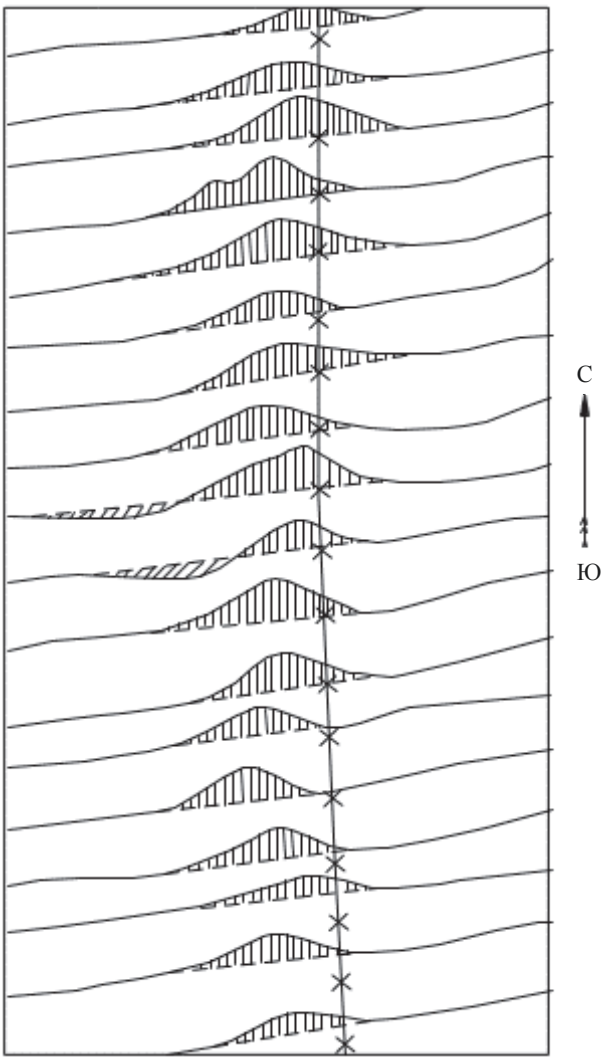

Рисунок 1. Картирование Красновишерско-Ныробского надвига на плане графиков $\Delta T_а$, нТл: линия с крестиками – линия выхода на поверхность земли плоскости надвига; горизонтальный масштаб 1 : 50 000; вертикальный масштаб в 1 см 40 нТл

Figure 1. Mapping of the Krasnovishersky-Nyrobsky thrust on the plan of graphs $\Delta T_а$, nT: line with crosses is the crop line of the thrust plane land surface; horizontal scale is 1 : 50,000; vertical scale is 1 cm per 40 nT

Для слоисто-зональной модели структурно-тектонического объекта с латеральной изменчивостью магнитной восприимчивости пород по кусочно-линейному закону были вычислены ожидаемые аномалии магнитного поля *T* для физико-геологических условий ВКМКС (рис. 2).

Теоретические расчеты показали, что при благоприятных физико-геологических условиях интенсивность ожидаемых аномалий *T* может достигать 6–12 нТл и больше, т. е. в 2–4 раза превышать среднеквадратичную погрешность аэромагнитной съемки ±(2–3) нТл. Таким образом, эти аномалии будут надежно регистрироваться квантовыми и протонными магнитометрами и, следовательно, их можно использовать для изучения структурно-тектонических объектов, находящихся в верхнем терригенном комплексе ВКМКС.

Данные аэромагнитной съемки, выполненной на территории ВКМКС в пределах области развития соляно-калийной залежи с использованием аэромагнитометров ММС-214, ММ-305, СКАТ-77 (*Халымбаджа И. Г. Отчет об аэромагнитной съемке…*), подтвердили результаты теоретических исследований (рис. 2). На отчетных картах $\Delta T_а$ (сечение карты изодинам 10 нТл, вертикальный масштаб графиков ±50 нТл) уверенно выделено большое количество локальных и региональных аномалий магнитного поля, источниками которых являются различные структурно-тектонические объекты, залегающие в пределах верхнего терригенного комплекса ВКМКС. Магнитоактивные объекты, находящиеся в среднем и нижнем комплексах или совсем не проявляются в результатах аэромагнитной съемки, или их интенсивность такова, что аномалии, обусловленные ими, не могут быть количественно проинтерпретированы и, следовательно, продуктивно использованы для изучения геологического строения осадочной толщи ВКМКС (рис. 3).

Анализ и обсуждение результатов. Интерпретация результатов аэромагнитной съемки позволила впервые установить несколько закономерностей в характере магнитного поля ВКМКС, важных для понимания структурно-тектонического строения месторождения.

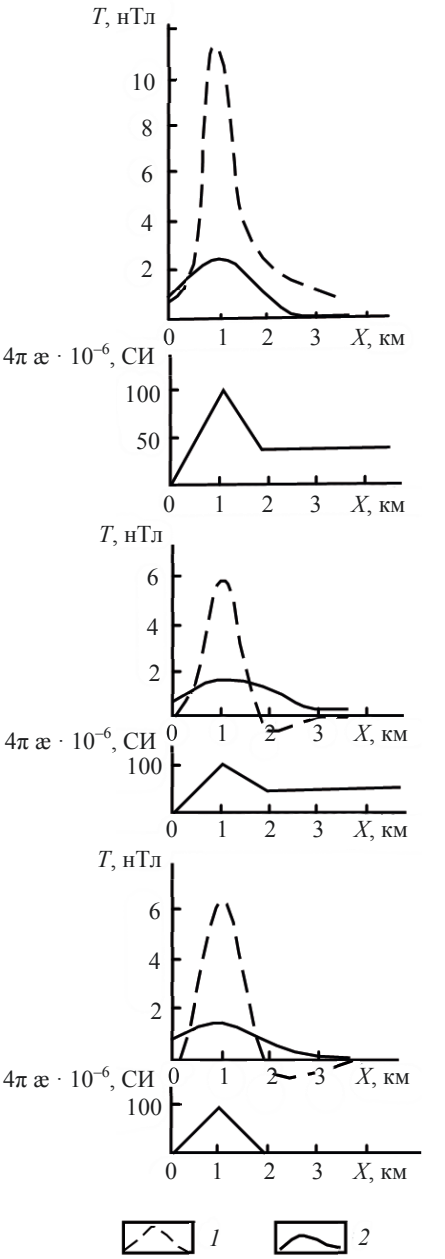

Рисунок 2. Теоретические кривые *T*, нТл, рассчитанные от плоскопараллельного слоя при кусочно-линейном законе изменения магнитной восприимчивости (4π æ · 10^{-6}, ед. СИ): *1* – глубина залегания слоя 350 м; *2* – глубина залегания слоя 650 м

Figure 2. Theoretical curves *T*, nT, calculated from a plane-parallel layer with a piecewise linear law of magnetic susceptibility variation (4π æ · 10^{-6}, SI units): *1* – layer depth is 350 m; *2* – layer depth is 650 m

На плане изодинам фрагментарно картируется узкая линейная отрицательная аномалия интенсивностью около 30 нТл. Источником аномалии является Красновишерский вал, сложенный немагнитными соляными породами, залегающими среди магнитных терригенных пород шешминского возраста. Вал сформировался в результате соляной тектоники в осевой зоне Красноуфимского глубинного разлома, который служит границей между Восточно-Европейской платформой и Предуральским краевым прогибом. По результатам бурения и количественной интерпретации установлено, что вершина вала залегает на глубине от 100 до 300 м от поверхности земли, амплитуда

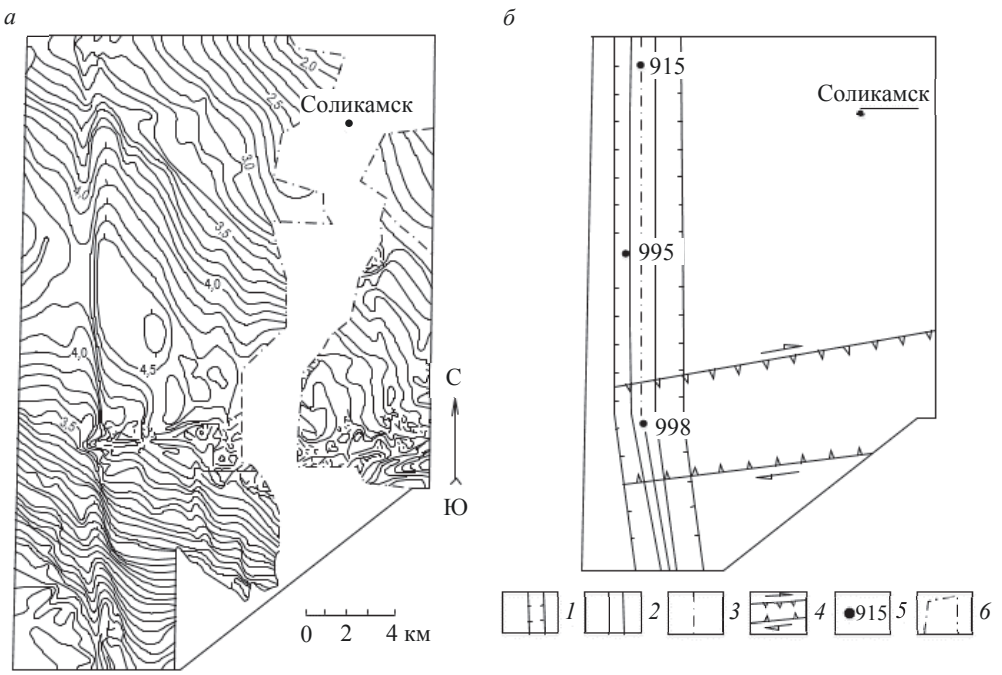

Рисунок 3. Упрощенный план изодинам ΔT_a Соликамско-Березниковской части территории ВКМКС – *а*, с элементами тектоники – *б*: *1* – зона Красноуфимского разлома; *2* – зона Красновишерского соляного вала; *3* – осевая линия Красновишерского соляного вала; *4* – границы Дуринского прогиба и направления сдвигания; *5* – положение скважин и их номера; *6* – контуры территории ВКМКС, на которой аэромагнитные измерения не проводились из-за высокого уровня промышленных помех; изодинамы оцифрованы в сотнях нТл

Figure 3. Simplified plan of isodynamic lines ΔT_a of the Solikamsk-Berezniky part of the VKMKS territory – *a*, with elements of tectonics – *б*: *1* – zone of the Krasnoufimsky fault; *2* – zone of the Krasnovishersky salt arch; *3* – the axial line of the Krasnovishersky salt arch; *4* – boundaries of the Durinsky trough and shearing directions; *5* – well positions and numbers; *6* – contours of the VKMKS territory, where aeromagnetic measurements were not carried out due to the high level of industrial noise; isodynamic lines are digitized in hundreds of nT

вала около 200–250 м, ширина у основания около 5 км. Параллельно этой линейной аномалии, восточнее и западнее, закартированы менее интенсивные и менее протяженные линейные аномалии, источниками которых являются трещинные зоны, представляющие собой элемент структурного парагенезиса в зоне динамического влияния Красноуфимского разлома.

Восточнее Красновишерской аномалии закартирована региональная положительная аномалия интенсивностью около 70 нТл эллиптической формы, ориентированная в субширотном направлении. Источником аномалии являются

терригенные образования, залегающие на глубине около 500 м. Границами этих образований на западе служит Красноуфимский разлом, а на востоке – сдвинутая в восточном направлении граница соленосных отложений ВКМКС.

Севернее и южнее Дуринского прогиба характер магнитного поля существенно различен. Магнитное поле южнее прогиба имеет мозаичный характер. Горизонтальный градиент магнитной индукции ΔT_a северной стороны прогиба в 2–3 раза меньше, чем южной. Как показали расчеты, это объясняется тем, что глубина залегания источников магнитного поля с южной стороны прогиба меньше, чем с северной, т. е. геологические объекты, отождествляемые с источниками магнитных аномалий, южнее прогиба залегают на меньшей глубине по сравнению с такими же геологическими объектами севернее прогиба. Вывод о разной гипсометрической характеристике Соликамской и Березниковской частей ВКМКС сделан еще в 1920-е гг. П. И. Преображенским [6] при разведке месторождения. Теперь этот вывод косвенно подтвержден результатами аэромагнитной съемки. В результатах других геофизических исследований эта гипсометрическая особенность ВКМКС не проявляется. Разная глубина залегания Соликамской и Березниковской частей ВКМКС обусловлена подвижкой в вертикальном направлении блока фундамента, ограниченного Дуринским и Боровицким разломами.

Дуринский прогиб по кровле солей, как было показано в [7, 8], сформировался в результате левостороннего сдвига. Характерным морфологическим признаком прогиба служит система кулисообразных локальных аномалий силы тяжести. Источниками этих аномалий являются погружения в кровле соли, заполненные плотными терригенными образованиями. Терригенные образования (табл. 1) обладают высокой магнитной восприимчивостью. Поэтому в магнитном поле погружения картируются также системой кулисообразных локальных магнитных аномалий. В отличие от гравитационных, магнитные аномалии проявлены менее четко из-за большей неоднородности терригенных образований по магнитной восприимчивости, чем по плотности.

Простирание Дуринского прогиба почти перпендикулярно простиранию Красноуфимского разлома и, соответственно, Красновишерского вала. Из характера магнитного поля района взаимоотношений разлома, вала и прогиба следует, что прогиб, упираясь в разлом, разрушил в этом месте соляной вал. Поскольку возраст вала шешминский, то Дуринский прогиб имеет послешешминское время, как это ранее было показано в [7]. Но в данном случае этот вывод получен только на основе анализа результатов аэромагнитной съемки.

Ориентировка локальных положительных и отрицательных магнитных аномалий не случайна, она соответствует общему тектоническому плану ВКМКС [9, 10].

Выводы и область применения результатов. Геологическая (структурно-тектоническая) интерпретация результатов площадной высокоточной аэромагнитной съемки масштаба 1 : 10 000 позволила сделать следующие выводы:

– результаты анализа петромагнитных данных и физико-геологических моделей дают обоснование для применения аэро- и наземного магнитного метода для картирования структурно-тектонических объектов ВКМКС;

– высокая степень полноты и обоснованности изучения структурно-тектонического строения ВКМКС геофизическими методами может быть достигнута только при условии выполнения детальных и высокоточных измерений на всей территории месторождения, а не для отдельных его участков и районов, как это сделано в [10–15] и других работах;

– результаты аэромагнитной съемки позволили получить ряд новых данных о строении и возрасте некоторых структурно-тектонических элементов ВКМКС;

– физико-геологические предпосылки геофизических методов различны, но для условий ВКМКС всем им присуща следующая закономерность: границы изменения магнитных свойств пород совпадают с границами раздела плотности, упругих, электрических и других свойств. Эта закономерность позволяет строить общие слоисто-зональные геометрические модели структурно-тектонических объектов и комплексировать различные методы геофизики для решения структурно-тектонических задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кассин Г. Г., Халымбаджа И. Г., Мавричев В. Г. О закономерностях распределения магнитных свойств осадочных пород на территории Приуралья // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: межвуз. научно-темат. сб. Пермь: ПГУ, 1981. С. 120–124.

2. Новоселицкий В. М., Сосланд С. А., Килейко Е. С. Послойная зональность физических параметров осадочных толщ и динамика структурообразования // Труды ВНИГНИ. 1973. Вып. 123.

3. Кассин Г. Г., Гринкевич Г. И., Шершнев К. С. Об эффективности аэромагнитных съемок при картировании структур в осадочном чехле Пермского Приуралья // Геофизические методы поисков и разведки. 1976. Вып. 3. С. 9–16.

4. Боронин В. П. О взаимосвязи магнитных свойств и геологических особенностей отложений верхней перми и триаса на востоке Русской платформы // Труды ВНИГНИ. 1974. Вып. 160. С. 202–208.

5. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / под науч. ред. А. И. Кудряшова. Пермь: ГИ УрО РАН, 2004. 194 с.

6. Преображенский П. И. Геологоразведочные работы на калий в Соликамском и Березниковском районах за период с 1 октября 1925 г. по 1 октября 1926 г. Материалы по исследованию Прикамского соленосного района. Л., 1929. 17 с.

7. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Природа и динамика Дуринского прогиба // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 4. С. 111–119.

8. Philatov V., Bolotnova L., Vandysheva K. Horizontal shear zones and their reflection in gravitational field // Pract. and theoret. aspect of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proc. of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar. Kazan, 2019. P. 339–347.

9. Филатов В. В., Болотнова Л. А. О тектоническом плане Верхнекамского месторождения калийных солей по результатам физического моделирования и геолого-геофизическим данным // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 60–67.

10. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Generalizing the results of fracture zones study in the Upper Kama potassium salt deposit with the help of gravity study // News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2021. No. 3. P. 79–87. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-79-87

11. Konstantinova S. A., Chernopazov N. N., Gulyev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model // Journal of Mining Science. 2001. Vol. 37. No. 5. P. 447–454.

12. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. No. 6. P. 902–907.

13. Shulakov D. Y., Buturin P. G., Verkholantsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: objectives problem solutions // Mining Journal. 2018. No. 6. P. 25–29.

14. Щербинина Г. П. Реконструкция тектонических элементов по результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. 2018. Вып. 16. С. 167–172.

15. Щербинина Г. П., Простолупов Г. В. Особенности строения западного склона Рудничного соляного поднятия по результатам интерпретации гравитационных данных // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: матер. 48-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д. Г. Успенского–В. Н. Страхова (24–28 января 2022 г., Санкт-Петербург): сб. науч. тр. СПб: ВСЕГЕИ, 2022. С. 279–284.

Поступила в редакцию 20 ноября 2022 года

Сведения об авторах:

Филатов Владимир Викторович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Владимирского государственного университета. E-mail: filatov47@bk.ru; https://orcid.org/0000-0002-8159-6488

Болотнова Любовь Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Уральского государственного горного университета. E-mail: l.bolotnova@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5610-3688

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-96-106

Mapping the structural and tectonic objects of the Upper-Kama potassium salt deposit in the magnetic field

Vladimir V. Filatov[1], Liubov A. Bolotnova[2]
[1] Vladimir State University, Vladimir, Russia.
[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Petrophysical properties of rocks and strata reflect the long history of the Upper Kama potassium salt deposit (VKMKS) formation and development (about 300 million years) as well as its various endogenous and exogenous geological and geochemical processes. VKMKS geological structure as well as past and present processes at the field are effectively studied by geophysical methods. Experience has shown that, considering the gigantic area of the salt strata development and multi-layer potassium-magnesium salt deposits, high-precision and detailed geophysical studies performed on most of the VKMKS territory are most effective from a geological viewpoint, namely, gravity survey at a scale of 1 : 25,000 and aeromagnetic survey at a scale of 1 : 10,000 together with other geological and geophysical data. VKMKS structural-tectonic objects occurrence conditions and magnetic properties of their rocks and strata, especially magnetic susceptibility, form the petrophysical basis for the aeromagnetic survey applied to map the objects. The task of mapping structural-tectonic objects on the VKMKS territory in a magnetic field is a specific task of using aeromagnetic survey to map structural-tectonic objects in a weakly magnetic sedimentary cover of the entire Perm Cis-Urals.*

Methods of research *includes studying and analyzing the research data of the Perm Cis-Urals sedimentary cover rock magnetic properties (magnetic susceptibility). The morphology of structural-tectonic objects magnetic field anomalies in the Perm Cis-Urals sedimentary cover and the morphology of VKMKS structural-tectonic objects magnetic field anomalies are studied and analyzed.*

Research results. *The analysis of sedimentary cover rocks magnetic susceptibility and aeromagnetic survey data interpretation showed that the structural-tectonic objects of the cover create anomalies in the magnetic field. The anomalies exceed the intensity of three times the root-mean-square measurement error, and therefore are mapped with confidence.*

Conclusions. *It is reasonable to use the data of areal high-precision aeromagnetic survey at a scale of 1 : 10,000 together with other geological and geophysical methods to improve the reliability of mapping such important structural and tectonic objects as tectonic faults of various ranks, from deep faults to fracture zones, at VKMKS.*

Keywords: *Perm Cis-Urals; Upper Kama potassium salt deposit; structural-tectonic objects; magnetic field; magnetic susceptibility; sediment cover.*

REFERENCES

1. Kassin G. G., Khalymbadzha I. G., Mavrichev V. G. On the regularities of sedimentary rock magnetic properties distribution at the territory of the Cis-Urals region. In: *Geophysical methods of oil and gas exploration: interacademic scientific and subject collection*. Perm: PSU Publishing; 1981. p. 120–124. (In Russ.)

2. Novoselitskii V. M., Sosland S. A., Kileiko E. S. Layer-by-layer zoning of sedimentary masses physical parameters and the dynamics of structure formation. *Trudy VNIGNI = Proceedings of the All-Russian Research Geological Oil Institute (VNIGNI*). 1973; 123. (In Russ.)

3. Kassin G. G., Grinkevich G. I., Shershnev K. S. On the effectiveness of aeromagnetic survey when mapping the structure within the sedimentary cover of the Perm Cis-Urals. *Geophysical methods of exploration*. 1976; 3: 9–16. (In Russ.)

4. Boronin V. P. On the interrelationship between magnetic properties and geological features of the Upper Perm and Triassic sediments to the east of the Russian platform. *Trudy VNIGNI = Proceedings of the All-Russian Research Geological Oil Institute (VNIGNI*). 1974; 160: 202–208. (In Russ.)

5. Kudriashov A. I. (ed.) Fault tectonic of the Upper Kama potassium salt deposit. Perm: MI UB RAS Publishing; 2004. (In Russ.)

6. Preobrazhenskii P. I. *Geological exploration for potassium in the Solikamsk and Berezniki regions over a period of 1 October 1925 to 1 October 1926. Materials on the salt bearing Kama River area exploration*. Leningrad: 1929. (In Russ.)

7. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Nature and dynamics of the Durinsky trough. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 4: 111–119. (In Russ.)

7. Philatov V., Bolotnova L., Vandysheva K. Horizontal shear zones and their reflection in gravitational field. In: *Pract. and theoret. aspect of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proc. of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar*. Kazan, 2019. p. 339–347.

8. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Upper Kama potassium salt deposit tectonic scheme based on physical modeling results and geological and geophysical data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 5: 38–46. (In Russ.)

9. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Generalizing the results of fracture zones study in the Upper Kama potassium salt deposit with the help of gravity study. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 79–87. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-3-79-87

10. Konstantinova S. A., Chernopazov N. N., Gulyev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model. *Journal of Mining Science*. 2001; 37(5): 447–454.

11. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science*. 2013; 49(6): 902–907.

12. Shulakov D. Y., Buturin P. G., Verkholantsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: objectives problem solutions. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2018; 6: 25–29. (In Russ.)

13. Shcherbinina G. P. Reconstructing tectonic elements based on the results of geology and geophysics data integrated interpretation. In: *Strategy and processes of georesources development: collection of studies*. 2018; 16: 167–172. (In Russ.)

14. Shcherbinina G. P., Prostolupov G. V. Structural features of the western slope of Rudnichny salt rise based on the gravitation data interpretation. In: *Theory and practice of geophysical fields geological interpretation: Proceedings of the 48th session of the Internat. sci. seminar named after D. G. Uspenskii and V. N. Strakhov (24–28 January 2022, St. Petersburg): collection of studies*. St. Petersburg: VSEGEI; 2022. p. 279–284. (In Russ.)

Received 20 November 2022

Information about the authors:

Vladimir V. Filatov – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, professor of the Department of Motorways, Vladimir State University. E-mail: filatov47@bk.ru; https://orcid.org/0000-0002-8159-6488
Liubov A. Bolotnova – PhD (Geology and Mineralogy), associate professor of the Department of Geophysics, Ural State Mining University. E-mail: l.bolotnova@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5610-3688

Для цитирования: Филатов В. В., Болотнова Л. А. Картирование структурно-тектонических объектов Верхнекамского месторождения калийных солей в магнитном поле // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 96–106. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-96-106
For citation: Filatov V. V., Bolotnova L. A. Mapping the structural and tectonic objects of the Upper-Kama potassium salt deposit in the magnetic field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 2: 96–106 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-96-106