



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 504.55+550.8.053:550.838.5

EDN: PEEDSN

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-289-305



Динамическая физико-геологическая модель сложной складчатости по палеомагнитным данным

К.М. Константинов^{а,б}

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^бИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью работы являлась оценка возможности применения математического аппарата пространственных вращений для решения вопросов установления природы и возраста векторов естественной остаточной намагниченности в условиях сложных тектонических дислокаций горных пород, проявленных на территориях современных складчатых сооружений обрамления платформ. Для формирования сложных тектоно-магматических систем целесообразно использовать динамические физико-геологические модели. Математическое (компьютерное) моделирование по сравнению с другими методами изучения геологических процессов характеризуется более высокой точностью, экономичностью и однозначностью интерпретации данных для достижения поставленной цели. На основе динамической физико-геологической модели сложной складчатости разработан алгоритм и приведены результаты математического моделирования векторов естественной остаточной намагниченности для решения прямой и обратной задач по корректному применению теста складки в условиях сложных деформаций горных пород. На основе динамической физико-геологической модели формирования сложной складчатой структуры показано, что по выделенным в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию векторам характеристической естественной остаточной намагниченности можно определить их возраст относительно этапов складчатости, а также в зависимости от этого полностью или частично восстановить количество, последовательность и направленность тектонических дислокаций. Это позволит более эффективно решать минерагенические и геодинамические задачи развития складчатых областей на основе палеомагнитных данных.

Ключевые слова: динамическая физико-геологическая модель, палеомагнетизм, тест складки, характеристическая естественная остаточная намагниченность

Для цитирования: Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель сложной складчатости по палеомагнитным данным // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 289–305. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-289-305>. EDN: PEEDSN.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

Dynamic physical-geological model of complex folding according to paleomagnetic data

Konstantin M. Konstantinov^{а,б}

^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^бInstitute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to evaluate the possibility of using the mathematical apparatus of spatial rotations to solve the determination issues of the nature and age of natural remanent magnetization vectors under complex tectonic



dislocations of rocks manifested in the areas of modern folded structures of platform framing. Dynamic physical-geological models are shown to be useful when forming complex tectonic-magmatic systems. Mathematical (computer) modeling in comparison with other methods of studying geological processes features higher accuracy, cost-effectiveness and unambiguity of data interpretation in achieving the set goal. On the basis of dynamic physical-geological model of complex folding, an algorithm is developed and the results of mathematical modeling of natural remanent magnetization vectors are given for solving direct and inverse problems on correct application of the fold test under complex rock deformations. The dynamic physical-geological model of complex folded structure formation shows that the characteristic natural remanent magnetization vectors identified in laboratory experiments on demagnetization can be used to determine their age relative to the folding stages, and, depending on this, fully or partially restore the number, sequence and direction of tectonic dislocations. This will enable us to solve the mineralogenic and geodynamic problems of folded region development more effectively on the basis of paleomagnetic data.

Keywords: dynamic physical-geological model, paleomagnetism, fold test, characteristic natural remanent magnetization

For citation: Konstantinov K.M. Dynamic physical-geological model of complex folding according to paleomagnetic data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):289-305. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-289-305>. EDN: PEEDSN.

Введение

В системе научных знаний моделирование используется для решения разного рода проблем, в том числе в ходе формирования и проверки гипотез. Модель – это искусственно созданный объект, который, будучи аналогичен исследуемому объекту, отображает и воспроизводит в более простом, уменьшенном (увеличенном) виде структуру, свойства, взаимосвязи и отношения между элементами исследуемого объекта, непосредственное изучение которого связано с какими-либо трудностями, большими затратами средств и энергии или просто недоступно¹. Практически модель является наглядным образом теории. Цель моделирования заключается в создании модели, максимально подобной оригиналу, и извлечении на ее основе информации, которую по каким-либо причинам трудно или невозможно получить в естественных условиях, или тогда, когда необходимо облегчить процесс исследования объекта. Виды моделирования могут быть различными: существует физическое, аналоговое, концептуальное, математическое моделирование и т. д.

В геологии, где предметами исследования служат Земля и ее оболочки, горные породы разного генезиса и связанные с ними различные процессы и пр., моделирование является единственным способом (методом) для получения информации об их строении и развитии. Для этого предназначены физико-геологические модели (ФГМ), принципы построения которых развивал профессор Г.С. Вахромеев [1]. ФГМ представляют собой систему абстрактных возмущающих тел и вызываемых ими аномальных эффектов, которые аппроксимируют геологический объект и с необходимой для моделирования детальностью обобщенно отражают его структуру, размеры, форму, петрофизические свойства и соответствующее им объемное распределение физических полей. Современные детерминированные и вероятностно-стохастические ФГМ относятся к статическим, то есть описывают геологические структуры, месторождения полезных ископаемых или рудные тела как итог происходивших ранее геологических процессов, отражаемый современным распределением физических полей. В то же время геофизические поля несут информацию о самих геологических процессах, их характере, смене одного другим, глубине протекания каждого из них.

ФГМ, направленные на установление зависимости между физическими полями и протекающими геологическими процессами во времени, именуются динамическими [1]. Благодаря динамическим ФГМ можно предсказать размещение месторождений полезных ископаемых (ретроспективный анализ), землетрясения, экологические катастрофы и т. п. Кроме того, динамические ФГМ широко используются и для доказательства выводов теории тектоники литосферных плит² [2–4]. Эта теория развивается на стыке нескольких частных научных теорий (разрастание

¹ Кондаков Н.И. Логический словарь-справочник. М.: Наука, 1975. 720 с.

² Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеоманнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.



океанического дна, дрейф континентов, тектоника литосферы и др.), в основе которых лежат данные из разных областей науки. Например, в основе гипотезы Вайна – Метьюза [5], объясняющей разрастание океанического дна, лежит динамическая ФГМ: мы наблюдаем «старение» океанической коры от центра спрединга (срединно-океанический хребет) к материкам одновременно с увеличением ее мощности, глубин океана и числа магнитных полосовых аномалий, зависящих от инверсий магнитного поля Земли. Из всей совокупности фактов, подтверждающих дрейф континентов (совпадение их очертания, продолжение геологических структур, сейсмические пояса, «горячие точки» и др.), траектория кажущейся миграции палеомагнитных полюсов Земли тоже является динамической ФГМ: каждому геологическому периоду соответствуют определенные координаты палеомагнитных полюсов относительно географического положения платформ [6]. «Ископаемый» (прошлый) магнетизм, древнее геомагнитное поле, запись которого сохранилась в естественной остаточной намагниченности (ЕОН) *In* горных пород подобно жесткому магнитному носителю, называется палеомагнетизмом. Изучением палеомагнетизма занимается наука палеомагнитология, которая представляет собой раздел геомагнитологии (метод исторической геофизики), учение о геомагнитном поле прошлых геологических эпох. Палеомагнитология возникла на стыке ряда отраслей физики, геофизики, геологии и является самостоятельной научной дисциплиной со своей методикой исследований, объектами изучения и областью приложения результатов. Результаты исследований находят приложение в изучении строения и эволюции Земли, в решении вопросов практической геологии³. Согласно принципу «центрального осевого диполя», являющемуся основополагающим принципом палеомагнетизма, двигаются не магнитные полюсы Земли, а материки (литосферные плиты). Поскольку магнитный полюс жестко связан с материком, благодаря последовательному «протягиванию» траектории кажущейся миграции палеомагнитного полюса через северный географический полюс можно реконструировать его палеогеографическое положение. Таким образом, с помощью современных компьютерных программ удастся восстановить палеогеографическое положение материков в разные геологические эпохи. Динамические ФГМ целесообразно использовать для решения широкого круга задач, например:

- глобальных: дрейф континентов, палеоклимат и связанные с ним экзогенные месторождения полезных ископаемых, развитие живых организмов и пр. [6–9];
- региональных: развитие горно-складчатых сооружений, магматизм и минералогия платформ [7, 8, 10, 11];
- локальных: формирование отдельных геологических структур, тел (в том числе месторождений полезных ископаемых), катастрофических явлений (оползни, землетрясения и т. п.) и др. [1, 3, 11, 12].

Как видно, в основе построения многих динамических ФГМ лежат палеомагнитные данные⁴ [6, 13]. Следует отметить, что возможности палеомагнитного метода для палеогеографических реконструкций блоков земной коры, участвующих в строении горно-складчатых областей, ограничены из-за сложных полихронных деформаций горных пород и развития в них разнообразных физико-химических процессов. В отличие от палеомагнитных реконструкций древних платформ (литосферных плит) реконструкции слагающих геосинклинальные области экзотических блоков (террейны) с целью изучения истории их геодинамического развития сопряжены с очевидными трудностями:

1. Сложными полихронными деформациями, последовательно искажающими направления векторов характеристической ЕОН *In^{ch}*, приобретенными горными породами с момента образования. Характеристическая остаточная намагниченность *In^{ch}* представляет собой наиболее стабильную компоненту ЕОН, выделенную в ходе магнитной чистки, на диаграмме Зийдервельда идущую в нуль [14]. Компоненты вектора ЕОН, которые претендуют на последующее получение

³ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

⁴ Там же.



палеомагнитного результата (то есть могут оказаться синхронными изучаемому геологическому событию прошлого), в практике палеомагнитных исследований принято обозначать как характеристические. Для датировки и оценки природы характеристической остаточной намагниченности необходим комплекс дополнительных исследований⁵.

2. Возможными перемагничиваниями первичных (синхронных горным породам) векторов ЕОН под действием химических, динамических и других процессов с образованием разных типов намагниченностей.

В таких сложных тектонических ситуациях необходимо надежное обоснование относительного возраста векторов ЕОН зафиксированными горными породами в момент становления. Очевидно, что наиболее оптимальным методом решения данной проблемы, обеспечивающим высокую точность и минимальные затраты времени по сравнению с физическим моделированием, будет являться математическое (в перспективе компьютерное) моделирование, основанное на законах аналитической геометрии, векторной алгебры и матричного исчисления⁶ [15, 16]. Это определяет актуальность проведения математического моделирования векторов ЕОН как основы обработки и интерпретации палеомагнитных данных для сложных тектонофизических обстановок. Основная цель математического моделирования заключается в разработке алгоритма реконструкции этапов складчатости по векторам характеристической ЕОН. Для этого на примере динамической ФГМ необходимо провести решения прямой и обратной задачи геофизики (палеомагнетизма) как основы количественной интерпретации тектонических деформаций горных пород складчатых областей.

Материалы и методы исследования

На уровне локальной динамической ФГМ необходимо реализовать два важных момента, от которых зависит вся дальнейшая интерпретация палеомагнитных исследований:

- получение корректных статистических параметров векторов характеристической ЕОН;
- обоснование природы и возраста векторов характеристической ЕОН.

При статистическом анализе направленных величин используется аппроксимация распределений единичных векторов ЕОН круговым рассеиванием, в котором вычисляется четыре параметра: среднее склонение D , наклонение J , кучность k и радиус овала доверия α_{95} ⁷ [6, 13, 17, 18]. Первые два аналогичны элементам магнитного поля Земли и обычно изображаются на равнопромежуточной полярной проекции единичной сферы. Параметры k и α_{95} характеризуют плотность распределения векторов ЕОН вокруг среднего направления.

Получение доказательств возраста и природы векторов характеристической ЕОН является одним из самых сложных вопросов. Палеомагнитные исследования основаны на «гипотезе сохранения» горными породами ЕОН в течение продолжительного времени⁸ [6, 13, 17, 19]. Гипотеза предполагает, что вектор ЕОН может содержать ряд остаточных намагниченностей, приобретенных горными породами и рудами за все время своего существования. В связи с этим при компонентном анализе ЕОН In горных пород мы можем столкнуться с несколькими ее разновидностями, которые классифицируются по различным признакам:

- по генезису: ориентационная ЕОН In^o , термоостаточная ЕОН In^t , химическая ЕОН In^c , вязкая ЕОН In^v и др.;
- по отношению к складчатости: до-, син- или постскладчатая ЕОН In^a , In^s , In^p ;
- по времени образования: первичная ЕОН In^0 и метахронная (наложенная) ЕОН In^m .

⁵ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

⁶ Александров П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для студентов. М.: Наука, 1979. 511 с.

⁷ Шипунов С.В. Статистика палеомагнитных данных: лекции. М.: ГЕОС, 2000. 80 с.

⁸ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.



Например, первичная ЕОН In^0 может быть ориентационной или термоостаточной и одновременно доскладчатой. Метахронная ЕОН In^m может возникнуть химическим путем или под действием динамических нагрузок (эффект Виллари) до, в процессе или после складкообразования и т. п. Таким образом, современная магнитная «память» горных пород может одновременно содержать некоторое множество палеомагнитных векторов (компонент) ЕОН: $In = In^0 + In^m + \dots + In^N$, которые в силу «гипотезы фиксации» (горные породы при своем становлении намагничиваются по направлению геомагнитного поля времени и места их образования) будут нести определенную информацию о сформировавших их геологических процессах. Любая из вышеперечисленных компонент может быть выделена из суммарной многокомпонентной ЕОН в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем, температурой и др. Не исключено, что магнитная запись горных пород о событиях далекого прошлого может быть забита или полностью стерта другими видами ЕОН, связанными с более поздними физико-химическими или геологическими процессами.

Для доказательства природы выделенной характеристической ЕОН необходим комплекс, позволяющий в той или иной мере однозначно определить величину и направление геомагнитного поля в точке исследований, привязанного ко времени некоторого геологического события. Данный комплекс включает три группы признаков: геологические, физические и геофизические (палеомагнитные)⁹. Для обоснования палеомагнитной надежности (набора необходимых и достаточных признаков (критериев), позволяющих оценить надежность (достоверность) палеомагнитных данных для решения поставленной задачи¹⁰) используется ряд тестов, одним из основных среди которых является «тест складки» Грэхема [20–30] – способ оценки палеомагнитной стабильности (устойчивости (сохранности) величины и направления ЕОН или ее компонент во времени; оценка палеомагнитной стабильности является частью проблемы обоснования палеомагнитной надежности¹¹) и оценки времени приобретения ЕОН или ее компонент, выделенных чистками, относительно времени смятия изучаемых пород в складки. Тест складки анализирует изменение конформности (по кучности k и / или радиусу овала доверия α_{95}) векторов характеристической ЕОН при пересчете из современной системы координат (ССК) в древнюю систему координат (ДСК) путем пропорционального введения поправок за элементы залегания пород из крыльев складки (рис. 1): доскладчатый (тест положительный) или постскладчатый (тест отрицательный). В случае доскладчатого образования ЕОН векторы последней в разных частях складки располагаются одинаково относительно слоистости (см. рис. 1, а); в случае, если ЕОН образовалась после складчатости, ее векторы располагаются параллельно друг другу независимо от элементов залегания пород в разных частях складки (см. рис. 1, с). Промежуточные варианты (синскладчатая намагниченность) имеют экстремальную картину в интервале от 0 до 100 % (см. рис. 1, b). Количественное соотношение до- и послескладчатой компонент ЕОН видно по соотношению кучностей векторов в современных (географических) координатах k_e или α_{95g} (то есть без введения поправки на залегание) и в древних (стратиграфических) координатах k_c или α_{95s} (после «выпрямления» складки до горизонтального залегания слоев). А как быть в случаях, когда с проявлениями тех или других тектонофизических процессов, поэтапно во времени осложняющих первоначальный облик пород, связан определенный тип характеристической ЕОН?

В связи с тем, что мы всегда имеем дело с векторами ЕОН, сориентированными только в ССК, то в условиях полихронной сложной складчатости возможности теста складки по определению природы и относительного возраста характеристической ЕОН горных пород ограничены. Сегодня ни один из модернизированных тестов складки не решает подобных вопросов. В лучшем случае в направления характеристической ЕОН по методике, предложенной в работе [6],

⁹ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

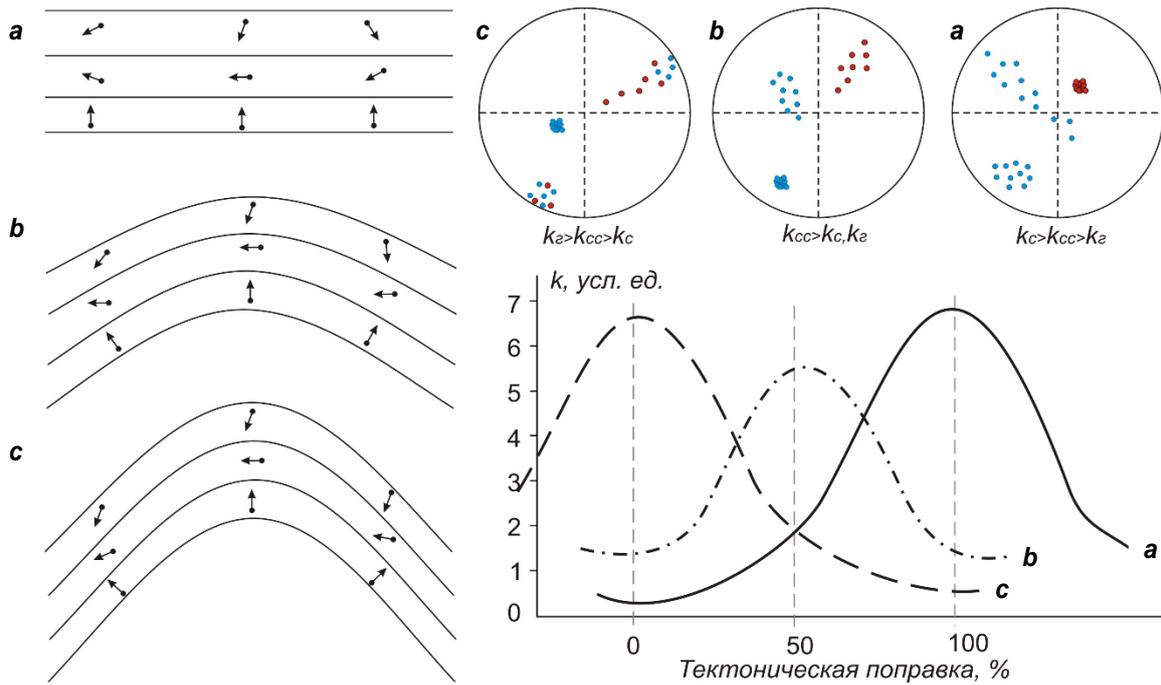


Рис. 1. Зависимость кучности распределения векторов характеристической естественной остаточной намагниченности от введения тектонической поправки за элементы залегания пород в крыльях складки

Естественная остаточная намагниченность: а – доскладчатая; б – синскладчатая; в – постскладчатая

Синие / красные кружочки – проекции векторов характеристической естественной остаточной намагниченности (первичной естественной остаточной намагниченности) на положительную / отрицательную полусферу стереограммы

k_c , k_{cc} и k_e – кучность в стратиграфической (древней), синскладчатой (промежуточной) и географической (современной) системах координат соответственно

Fig. 1. Dependence of characteristic natural remanent magnetization vector distribution on tectonic correction introduction for rock occurrence elements in the fold limbs

Natural remanent magnetization: a – pre-folding; b – syn-folding; c – postfolding

Blue / red circles are projections of the vectors of characteristic natural remanent magnetization (primary natural remanent magnetization) on the positive / negative hemisphere of the stereogram

k_c , k_{cc} and k_e – helicity in the stratigraphic (ancient), synfolded (intermediate), and geographic (modern) coordinate systems, respectively

вносится только поправка за наклон одного из шарниров складки, что при отсутствии дополнительной тектонической информации не всегда оправдано (как показано ниже). Таким образом, игнорирование этой проблемы может отрицательно сказаться на качестве палеомагнитных реконструкций.

Результаты исследования

Алгоритм векторных преобразований. В палеомагнетизме, согласно курсу аналитической геометрии, сложные вращения осуществляются путем последовательного выполнения элементарных поворотов на углы α , β , γ вокруг осей Z (вертикальная), Y (широтная) и X (меридиональная) пространственной декартовой системы координат соответственно¹². Например, преобразование вектора $[V_x, V_y, V_z]$ в результате вращения на угол α (в нашем случае является азимутом падения крыла или шарнира складки и меняется от 0 до 360°) в вектор $[V_x', V_y', V_z']$ реализуется матрица вида

$$[V_x', V_y', V_z'] = [V_x, V_y, V_z] \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [V_x, V_y, V_z] \cdot R(\alpha) \text{ или } \bar{V}' = \bar{V} \cdot R(\alpha).$$

¹² Александров П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для студентов. М.: Наука, 1979. 511 с.



Матрица, реализующая вращение вектора $[V_x, V_y, V_z]$ на угол β (в нашем случае является углом падения крыла или шарнира складки и меняется от -90° до 90°) вокруг оси Y , имеет вид

$$[V_x', V_y', V_z'] = [V_x, V_y, V_z] \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} = [V_x, V_y, V_z] \cdot R(\beta) \text{ или } \bar{V}' = \bar{V} \cdot R(\beta).$$

Матрица, реализующая вращение вектора $[V_x, V_y, V_z]$ на угол γ (например, поворот вмещающего складку блока) вокруг оси X , имеет вид

$$[V_x', V_y', V_z'] = [V_x, V_y, V_z] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} = [V_x, V_y, V_z] \cdot R(\gamma) \text{ или } \bar{V}' = \bar{V} \cdot R(\gamma).$$

Сложные вращения реализуются матричным произведением элементарных поворотов:

$$V' = V \cdot R(\alpha) \cdot R(\beta) \cdot R(\gamma) = V \cdot R(\alpha, \beta, \gamma).$$

Для решения поставленной задачи был использован математический аппарат пространственных вращений, являющийся основой системы обработки палеомагнитных данных ОПАЛ-3 [15, 16, 31, 32]. Для определения взаимоотношения векторов ЕОН со складчатостью применялась общая формула учета любого числа количественно заданных элементарных дислокаций:

$$(Jk', Dk') = (J, D) \cdot \prod_{i=1}^k [Ri], \quad (1)$$

где (Jk', Dk') – направление ЕОН после учета i -й элементарной дислокации; Ri – матрица (см. выше), реализующая учет i -го элементарного поворота пород:

$$Ri = \begin{cases} R(-\alpha_i, \beta_i, \alpha_i), & \text{если } \beta_i \neq 0; \\ R(-\alpha_i), & \text{если } \beta_i = 0. \end{cases}$$

Краткая запись матричного уравнения (1) наиболее удобна для решения подобных задач, так как позволяет реализовать сложные повороты, зная только исходные параметры геологической структуры: азимуты и углы падения горных пород.

Алгоритм математического моделирования достаточно прост¹³ [31, 33, 34]. Рассмотрим его на примере динамической ФГМ формирования сложной складки (рис. 2). Для этого проанализируем результаты пересчета векторов характеристической ЕОН из ССК в ДСК с учетом наклона шарниров складки, то есть когда они вместе с горными породами испытали одну или две дислокации. В последнем случае, согласно предложенной ФГМ, шарниры складки могут оказаться следствием двух разделенных во времени и по направлениям приложения сил этапов тектонической активизации.

Итак, при наличии направлений характеристической ЕОН в ССК (J, D) , а также современных элементов залегания горных пород в точке опробования: азимуты и углы наклона крыла (Ar, Br) и двух ограничивающих его шарниров $(ar', br'$ и $ar'', br'')$ складки – рассчитывают элементы залегания пород, имевшие место до вторичного наклона пород (промежуточная система координат (ПСК)):

1. Определяют нормаль:

$$n = (Bn, An) = (90 - Br, 180 + Ar).$$

2. Определяют положение нормали до наклона шарнира складки соответственно:

$$\begin{aligned} n' &= (Bn', An') = (Bn, An) \cdot R(-\alpha, \beta, \alpha), \text{ если } \alpha = ar', \beta = br'; \\ n'' &= (Bn'', An'') = (Bn, An) \cdot R(-\alpha, \beta, \alpha), \text{ если } \alpha = ar'', \beta = br''. \end{aligned}$$

3. Пересчитывают элементы залегания пород, которые были до второй дислокации, соответственно:

$$\begin{aligned} (Br', Ar') &= (90 - Bn', 180 + An'), \\ (Br'', Ar'') &= (90 - Bn'', 180 + An''), \end{aligned}$$

где Br', Ar' и Br'', Ar'' – элементы залегания пород, исправленные за наклон шарнира складки соответственно; $\alpha = ar' + Dt$, $\beta = br'$ и $\alpha = ar'' + Dt$, $\beta = br''$; Dt – местное склонение.

¹³ Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.

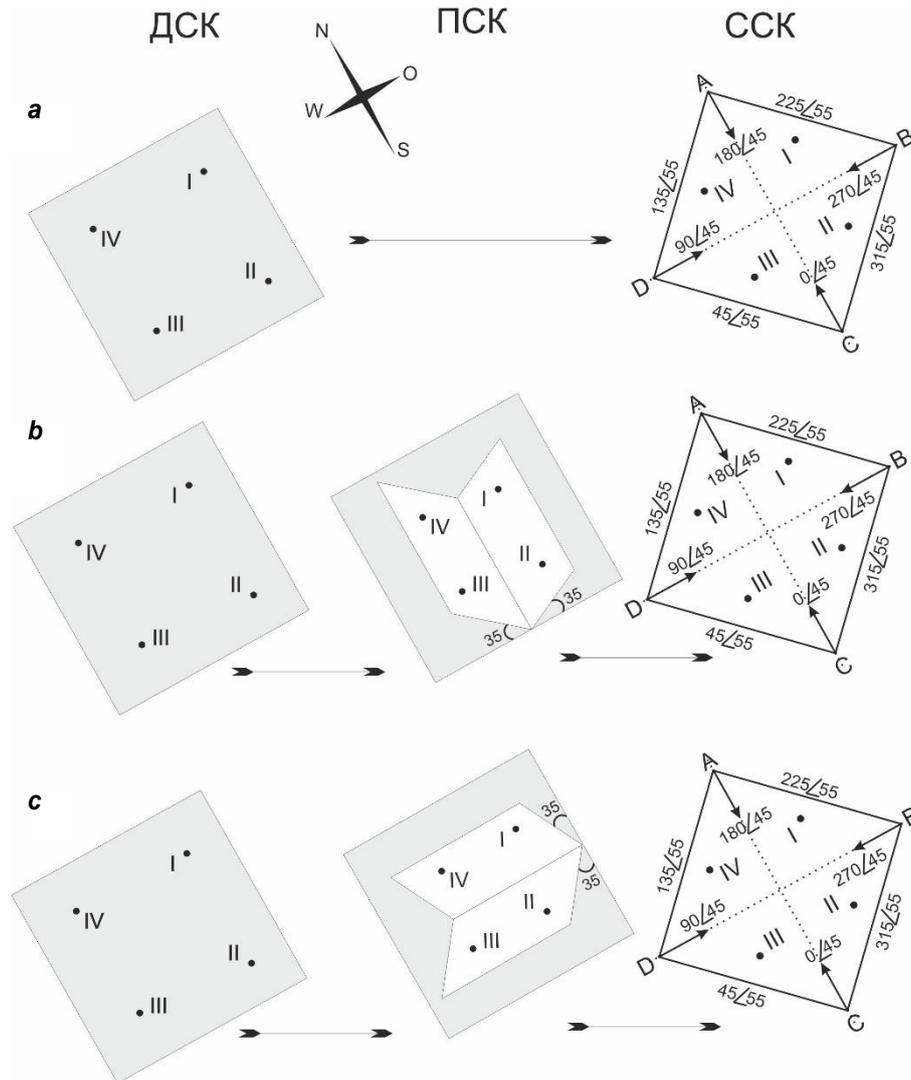


Рис. 2. Динамическая физико-геологическая модель формирования изоклиальной синклиальной складки с наклонными шарнирами в результате:
 а – всестороннего сжатия горных пород; б / в – вначале широтного / меридионального, а затем меридионального / широтного сжатий в горизонтальной плоскости
 ДСК, ПСК и ССК – древняя, промежуточная и современная системы координат соответственно
 I, II, III и IV – точки отбора проб
 ↑ – направление падения шарнира
 270∠45 – азимут и угол падения крыла или шарнира складки

Fig. 2. Dynamic physical-geological model of isoclinal synclinal fold formation with inclined hinges as a result of:

a – all-round compression of rocks; b / c – firstly latitudinal / meridional and then meridional / latitudinal compressions in the horizontal plane

ДСК, ПСК and ССК – ancient, intermediate and modern coordinate systems, respectively

I, II, III and IV – sampling points

↑ – direction of pivot dip

270∠45 – azimuth and angle of incidence of the limb or fold hinge

4. Имея все исходные данные, согласно формуле (1) можно рассчитать направления древней ЕОН пород, испытавших несколько фаз складчатости, путем последовательного учета элементарных дислокаций от поздних к ранним. В нашем случае согласно формуле

$$(J', D') = (J, D) \cdot R(-\alpha, \beta, \alpha, -\alpha', \beta, \alpha'), \quad (2)$$

можно предположить как минимум пять вариантов древних направлений векторов характеристической ЕОН (J^c , D^c), соответствующих возможным возрастным взаимоотношениям намагниченности и складчатости:



$$(J^C, D^C) = \begin{cases} (J_1^0, D_1^0), \text{ если } \alpha = Ar + Dt, \beta = Br, \alpha' = 0, \beta' = 0. \\ (J_2^0, D_2^0), \text{ если } \alpha = ar' + Dt, \beta = br', \alpha' = Ar' + Dt, \beta' = Br'. \\ (J_3^0, D_3^0), \text{ если } \alpha = ar'' + Dt, \beta = br'', \alpha' = Ar'' + Dt, \beta' = Br''. \\ (J_4^m, D_4^m), \text{ если } \alpha = ar' + Dt, \beta = br', \alpha' = 0, \beta' = 0'. \\ (J_5^m, D_5^m), \text{ если } \alpha = ar'' + Dt, \beta = br'', \alpha' = 0, \beta' = 0'. \end{cases} \quad (2, a)$$

Направления (J_1^0, D_1^0) , (J_2^0, D_2^0) , (J_3^0, D_3^0) определяют характеристическую ЕОН In^{ch} как древнюю и, возможно, первичную ЕОН In^0 , возникшую до начала деформаций с учетом их последовательности. Направление (J_1^0, D_1^0) не учитывает тектоническую поправку за наклон шарнира складки и может интерпретироваться как результат только одной дислокации из ССК в ДСК, минуя промежуточную стадию (см. рис. 2, а). Направления (J_4^m, D_4^m) и (J_5^m, D_5^m) определяют характеристическую ЕОН In^{ch} как метакронную ЕОН In^m , возникшую в период между двумя деформациями (ПСК) с учетом их взаимной комбинации (см. рис. 2, б, в).

5. Критерием для выбора оптимального варианта служит максимальное значение кучности ($k = \max$) или минимальное значение радиуса овала доверия ($\alpha_{95} = \min$) группировки In^{ch} , полученное в ходе пересчетов в разные системы координат. Обязательным условием для решения подобных задач является строгое соблюдение последовательности дислокаций.

Результаты моделирования. На основе предложенного алгоритма решены прямая (расчет направлений первичной ЕОН In^0 из ДСК в ССК) и обратная (расчет направлений характеристическую ЕОН In^{ch} из ССК в ПСК и ДСК) задачи¹⁴ [33, 34].

Рассмотрим прямую задачу.

Дано:

1) направление первичной ЕОН In^0 : $(J^0, D^0) = (-30, 325)$;

2) современные азимут и угол падения пород в четырех точках отбора проб (ТОП) (см. рис. 2):

$$(Ar, Br) = \begin{cases} I = 225, 55; \\ II = 315, 55; \\ III = 45, 55; \\ IV = 135, 55; \end{cases}$$

3) современные азимут и угол падения шарниров складки в точках А, В, С и D:

$$(ar, br) = \begin{cases} A = 180, 45; \\ B = 270, 45; \\ C = 360, 45; \\ D = 90, 45. \end{cases}$$

Определить: направления (J, D) первичной ЕОН In^0 в ССК в ТОП I, II, III и IV.

Решение:

1) согласно пунктам 1–3 алгоритма (см. выше) вычисляем промежуточные элементы залегания, исправленные за наклон шарниров для второго и третьего случая, когда крылья складки первоначально испытали поворот вокруг горизонтальной оси меридионального (см. рис. 2, б)

$$(Br', Ar') = \begin{cases} I = 270, 35; \\ II = 270, 35; \\ III = 90, 35; \\ IV = 90, 35 \end{cases}$$

либо широтного простирания (см. рис. 2, в)

$$(Br'', Ar'') = \begin{cases} I = 180, 35; \\ II = 360, 35; \\ III = 360, 35; \\ IV = 180, 35; \end{cases}$$

¹⁴ Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.



2) по условию задачи используем матричную формулу (2, а) только для первых трех вариантов:

$$(J, D) = \begin{cases} (J_1, D_1), \text{ если } \alpha = Ar + Dt, \beta = Br, \alpha' = 0, \beta' = 0. \\ (J_2, D_2), \text{ если } \alpha = Ar' + Dt, \beta = Br', \alpha' = ar' + Dt, \beta' = br'. \\ (J_3, D_3), \text{ если } \alpha = Ar'' + Dt, \beta = Br'', \alpha' = ar'' + Dt, \beta' = br''. \end{cases}$$

Результаты счета сводим в табл. 1 и выносим на стереограммы (рис. 3). Как видно, в трех вариантах решений прямой задачи для одних и тех же (исходных) структур направления векторов ЕОН в ССК различаются. Следовательно, результат зависит от числа, последовательности и направленности тектонических деформаций! Этот момент весьма важен при интерпретации решений обратной задачи. В первом случае направления ЕОН в ССК получены путем всестороннего сжатия (см. рис. 2, а), во втором (третьем) случае – сначала широтного (меридионального), а затем меридионального (широтного) (см. рис. 2, b, c).

Используя возможности нашего математического аппарата для определения возрастного взаимоотношения векторов ЕОН со складчатостью, решим обратную задачу.

Таблица 1. Решение прямой задачи: пересчет первичной естественной остаточной намагниченности из древней в современную систему координат
Table 1. Solution of the direct problem: recalculation of the primary natural remanent magnetization from an ancient to a modern coordinate system

Точки отбора проб	Древняя система координат		Современная система координат					
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	J^0	D^0	J_1	D_1	J_2	D_2	J_3	D_3
I	-30	325	-24	294	-36	301	-13	288
II	-30	325	24	325	24	310	20	338
III	-30	325	-9	345	1	353	-21	338
IV	-30	325	-80	17	-83	275	-68	38

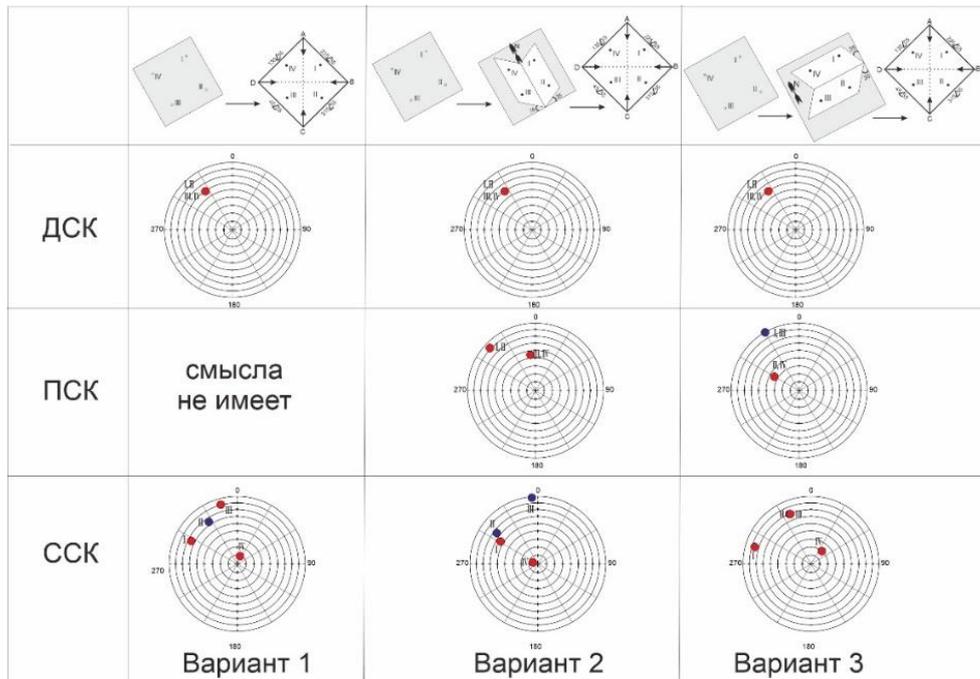


Рис. 3. Иллюстрация распределения векторов естественной остаточной намагниченности при решении прямой задачи (в соответствии с табл. 1)

Условные обозначения см. на рис. 1 и 2

Fig. 3. An image of natural remanent magnetization vector distribution when solving the direct problem (in accordance with Table 1)

See Figs. 1 and 2 for the legend



В качестве исходного примера для ее решения возьмем второй вариант прямой задачи (см. табл. 1), в котором заложено вращение крыльев складки вокруг горизонтальных осей сначала меридионального (широтное сжатие), а потом широтного (меридиональное сжатие) простира- ния (см. рис. 2, b).

Дано:

1) направление характеристической ЕОН In^{ch} в ССК в ТОП (вариант 2 табл. 1):

$$(Dn, Jn) = \begin{cases} I = 301, -36; \\ II = 310, 24; \\ III = 353, 1; \\ IV = 275, -83; \end{cases}$$

2) современные азимут и угол падения пород в ТОП I, II, III и IV:

$$(Ar, Br) = \begin{cases} I = 225, 55; \\ II = 315, 55; \\ III = 45, 55; \\ IV = 135, 55; \end{cases}$$

3) современные азимут и угол падения шарниров складки в точках A, B, C и D:

$$(ar, br) = \begin{cases} A = 180, 45; \\ B = 270, 45; \\ C = 360, 45; \\ D = 90, 45. \end{cases}$$

Определить: направления первичной ЕОН $In^0 (J^0, D^0)$ и метасинхронной ЕОН $In^m (J^m, D^m)$ в ТОП I, II, III и IV.

Решение:

1) подобно пунктам 1–3 алгоритма, вычисляем промежуточные элементы залегания пород, исправленные за наклон шарниров для второго и третьего случая;

2) используем матричную формулу (2, a).

Результаты счета сводим в табл. 2 и выносим на стереограммы (рис. 4). В данном случае выбор решения соответствует последовательности тектонических поворотов второго варианта (согласно схеме, заложенной нами в исходные условия: сначала произошло широтное сжатие, а затем меридиональное (см. рис. 2, b)), поскольку кучность направлений характеристической ЕОН In^{ch} в условных единицах составляет:

$$k_2 = 4 > k_1 = k_3 = k_4 = 2 > k_5 = k_{ССК} = 0.$$

Анализ материалов моделирования. Решения обратной задачи в палеомагнетизме, как и во всех других методах прикладной геофизики, многовариантны, но не бесконечны. Например, если при математическом моделировании для прямой задачи получилось три варианта (см. рис. 3), то в решении обратной задачи возможны уже десять вариантов: из них три варианта в ДСК, два варианта – в ПСК и пять вариантов для синскладчатой ЕОН (см. рис. 4).

Таблица 2. Решение обратной задачи в случае сохранности векторов первичной естественной остаточной намагниченности

Table 2. Solution of the inverse problem in the case of primary natural residual magnetization vector survival

Точки отбора проб	Современная система координат		Древняя система координат						Промежуточная система координат			
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	J_2	D_2	J^0	D^0	J^0	D^0	J^0	D^0	J^m	D^m	J^m	D^m
I	-36	301	-30	340	-30	325	-30	355	-7	315	-65	350
II	24	310	-30	310	-30	325	-30	295	-7	315	-12	307
III	1	353	-30	340	-30	325	-30	355	-44	350	6	356
IV	-83	275	-30	310	-30	325	-30	295	-44	350	-38	271
k	0		2		4		2		2		0	

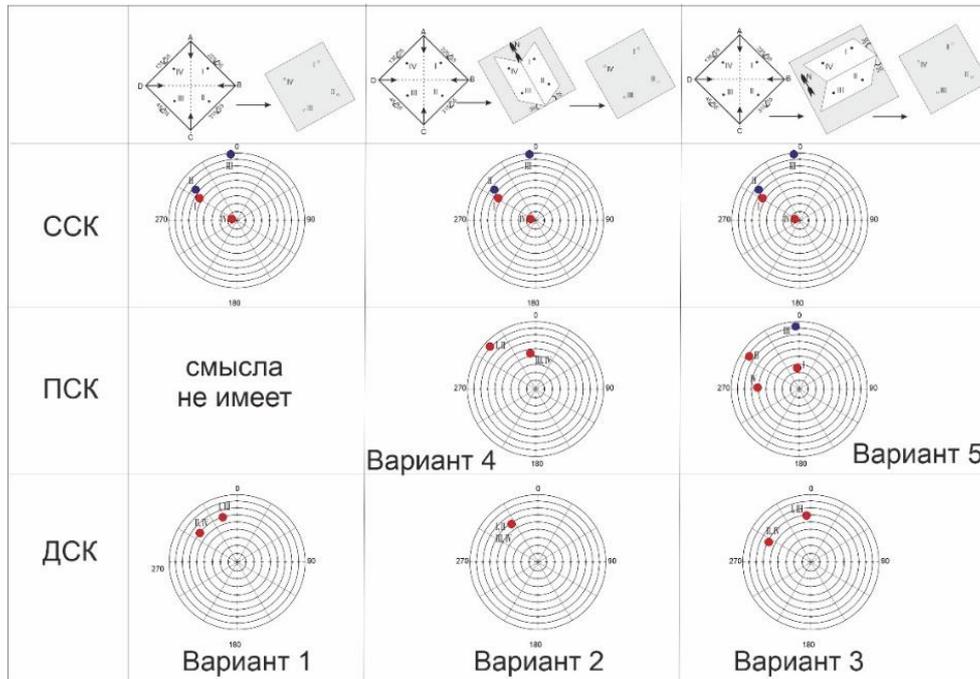


Рис. 4. Иллюстрация распределения векторов первичной естественной остаточной намагниченности при решении обратной задачи (в соответствии с табл. 2)

Условные обозначения см. на рис. 1–3

Fig. 4. An image of the primary natural remanent magnetization vector distribution when solving the inverse problem (in accordance with Table 2)

See Figs. 1–3 for the legend

Кроме того, для обратной задачи (см. рис. 4) следует отметить, что при отборе проб только из двух крыльев складки задача решается неоднозначно (тест складки неопределенный!). Например, в комбинации ТОП I и II (а также в других случаях, например, в паре ТОП III и IV) мы не сможем определить, первичная это или метакронная ЕОН, так как условные кучности в том и другом случае $k_2 = k_4 = 2$. В связи с этим обязательным условием для применения теста складки в условиях сложной складчатости является опробование не менее чем из трех крыльев (см. рис. 2).

На основе данного алгоритма легко убедиться, что в случае с метакронной ЕОН In^m : $(J^m, D^m) = (-30, 325)$, возникшей в промежуточную стадию складкообразования после меридионального сжатия, но до широтного (см. рис. 2, с), мы при тех же исходных данных современной структуры получим картину распределения векторов характеристической ЕОН In^{ch} , описанную в табл. 3 и на рис. 5:

$$k_5 = 4 > k_{ССК} = k_3 = 2 > k_1 = k_2 = k_4 = 0.$$

Из расчетов видно, что в ТОП I и II, а также III и IV без дополнительных данных по другим точкам определить, в какой системе координат и по какому из вариантов развиваются тектонические события, невозможно: кучности k для современных ЕОН (ССК) и метакронных ЕОН (вариант 5) равны 2. Для пар ТОП II–III и I–IV совпадают варианты 3 и 5.

Кроме того, данный алгоритм при использовании современных модификаций тестов складок [19–22, 25–27] позволяет установить и синскладчатую (см. рис. 1, b) природу характеристической ЕОН In^{ch} , возникшую между двумя тектоническими этапами: в периоды от ССК до ПСК или от ПСК до ДСК.

В работе рассмотрен только частный случай, соответствующий изоклинальной складчатости с вертикальной осью вращения: угол $\gamma = 0$. Следует ожидать, что наклон оси складки (угол $\gamma > 0$), который может быть связан, например, с вращением вмещающего ее блока, согласно формуле (1), приведет к увеличению числа комбинаций углов α, β, γ (ведь априори неизвестно



Таблица 3. Решение обратной задачи в случае образования векторов метакронной естественной остаточной намагниченности в промежуточной стадии
Table 3. Solution of the inverse problem for the case of metachronous natural remanent magnetization vector formation in the intermediate stage

Точки отбора проб	Современная система координат		Древняя система координат						Промежуточная система координат			
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	J_2	D_2	J^0	D^0	J^0	D^0	J^0	D^0	J^m	D^m	J^m	D^m
I	0	315	0	315	0	300	0	330	30	305	-30	325
II	0	315	-55	315	-55	330	-55	300	-30	305	-30	325
III	-45	350	-55	285	-55	270	-55	300	-90	0	-30	325
IV	-45	350	0	345	0	0	0	330	0	0	-30	325
k	2		0		0		2		0		4	

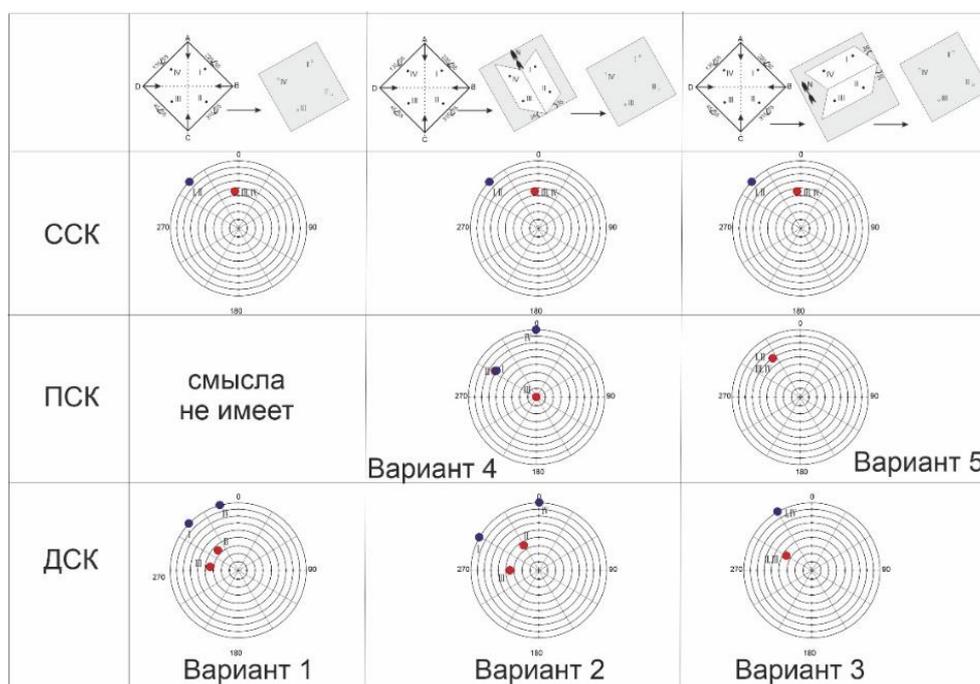


Рис. 5. Иллюстрация распределения векторов метакронной естественной остаточной намагниченности при решении обратной задачи (в соответствии с табл. 3)

Условные обозначения см. на рис. 1–3

Fig. 5. An image of metachronous natural remanent magnetization vector distribution when solving the inverse problem (in accordance with Table 3)

See Figs. 1–3 for the legend

время поворота блока, которое может пройти до, в процессе или после складчатости). В благоприятных случаях для этой цели может быть использована информация о тектоническом строении изучаемой площади.

Заключение

Математическое моделирование на примере динамической ФГМ формирования сложной складчатости показало, что:

1. По векторам характеристической ЕОН, сориентированным в современной системе координат, можно определить их возраст относительно этапов складчатости и в зависимости от этого полностью или частично восстановить количество, последовательность и направленность тектонических дислокаций.

2. Следует с особой тщательностью относиться к выбору и числу объектов палеомагнитных исследований (ТОП), а при математическом анализе компонентного состава ЕОН как можно



полнее использовать данные по структурной геологии. В противном случае либо тесты складки окажутся неопределенными, либо одна и та же характеристическая ЕОН образует некоторое подмножество «ложных» компонент.

3. Данный алгоритм совместим со всеми известными тестами складок.

4. Палеомагнитные исследования складчатой структуры желательнее сочетать с изучением анизотропии магнитной восприимчивости, что, возможно, позволит определиться с природой векторов характеристической ЕОН: термоостаточной, пьезоостаточной или другими [35–37].

Список источников

1. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике: монография. М.: Недра, 1987. 192 с.
2. Константинов К.М. Динамические физико-геологические модели в решении геолого-геофизических задач // Вопросы естествознания. 2017. № 1. С. 55–63. EDN: ZOWRVF.
3. Константинов К.М., Яковлев А.А., Антонова Т.А., Константинов И.К., Ибрагимов Ш.З., Артёмова Е.В. Петро- и палеомагнитные характеристики структурно-вещественных комплексов месторождения алмазов трубка Нюрбинская (Среднемархинский район, Западная Якутия) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 135–169. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0235>. EDN: YPOZID.
4. Константинов К.М., Шибeko Е.А., Шульга В.В. Региональная динамическая физико-геологическая модель Сибирской платформы в позднем девоне – раннем карбоне: установление парагенетической связи кимберлитов и углеводородообразования. Геофизика. 2020. № 3. С. 62–71. EDN: ХРКХТР.
5. Вайн Ф., Метьюз Д. Магнитные аномалии над океаническими хребтами // Новая глобальная тектоника (тектоника плит): сб. статей / ред. Л.П. Зоненшайн, А.А. Ковалев. М.: Мир, 1974. С. 32–37.
6. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология / ред. А.Н. Храмов. Л.: Недра, 1982. 312 с.
7. Кравчинский А.Я. Палеомагнитные и палеогеографические перестройки на докембрийских платформах. М.: Недра, 1977. 95 с.
8. Кравчинский А.Я. Палеомагнетизм и палеогеографическая эволюция континентов. Новосибирск: Наука, 1979. 264 с.
9. Scotese C.R., McKerrow W.S. Revised World maps and introduction // Geological Society, London, Memoirs. 1990. Vol. 12. P. 1–21. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.1990.012.01.01>.
10. Жандалинов В.М., Константинов К.М. Электродинамические и геодинамические аспекты кимберлитообразования // Наука и образование. 2011. № 1. С. 45–50. EDN: NEEWTH.
11. Константинов К.М., Томшин М.Д., Константинов И.К., Яковлев А.А. Палеомагнетизм среднепалеозойских базитов юго-восточного борта Вилуйского палеорифта // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 5. С. 607–612. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524865607-612>. EDN: OQAUEM.
12. Константинов К.М., Хороших М.С., Старкова Т.С., Лисковая Л.В., Кузина Д.М. Минералы-носители естественной остаточной намагниченности кимберлитов трубки Нюрбинская (Якутская алмазоносная провинция) // Геофизика. 2019. № 3. С. 15–26. EDN: NAUXVQ.
13. Butler R.F. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terrains. Oxford: Backwell Sci. Publ., 1992. 319 p.
14. Zijderveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results // Methods in paleomagnetism / eds. D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.
15. Житков А.Н. Математический аппарат пространственных вращений в задачах палеомагнитологии и геодинамики // Геофизические исследования Восточной Сибири на современном этапе: сб. науч. тр. Иркутск: ВостсибНИИГГиМС, 1990. С. 110–129.
16. Житков А.Н., Винарский Я.С. Матричный аппарат пространственных вращений в задачах палеомагнитологии // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: СНИИГГиМС, 1987. С. 139–141.
17. Храмов А.Н., Шолпо Л.Е. Палеомагнетизм: принципы, методы и геологические приложения палеомагнитологии. Л.: Недра, 1967. 251 с.
18. Fisher R.A. Dispersion on a sphere // Proceedings of the Royal Society A. 1953. Vol. 217. Iss. 1130. P. 295–305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
19. Шипунов С.В. Выделение компонент многокомпонентной естественной остаточной намагниченности при палеомагнитных исследованиях // Палеомагнетизм и аккреционная тектоника: сб. науч. тр. / ред. А.Н. Храмов. Л.: ВНИГРИ, 1988. С. 173–185.
20. Баженов М.Л., Шипунов С.В. Метод складки в палеомагнетизме // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1988. № 7. С. 89–101.
21. Шипунов С.В. Новый тест складки в палеомагнетизме (реабилитация теста выравнивания) // Физика Земли. 1995. № 4. С. 67–74.



22. Shipunov S.V. Synfolding magnetization: detection, testing and geological applications // *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 130. Iss. 2. P. 405–410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05656.x>.
23. Bazhenov M.L., Shipunov S.V. Fold test in paleomagnetism: new approaches and reappraisal of data // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. Vol. 104. Iss. 1. P. 16–24. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90233-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90233-8).
24. Enkin R.J. The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 212. Iss. 1-2. P. 151–166. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00238-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00238-3).
25. Graham J.W. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks // *Journal of Geophysical Research*. 1949. Vol. 54. Iss. 2. P. 131–167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
26. McFadden P.L. A new fold test for palaeomagnetic studies // *Geophysical Journal International*. 1990. Vol. 103. Iss. 1. P. 163–169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01761.x>.
27. McFadden P.L., Jones D.L. The fold test in palaeomagnetism // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1981. Vol. 67. Iss. 1. P. 53–58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02731.x>.
28. McElhinny M.W. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1964. Vol. 8. Iss. 3. P. 338–340. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1964.tb06300.x>.
29. Watson G.S. A test for randomness of directions // *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1956. Vol. 7. Iss. 4. P. 160–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1956.tb05561.x>.
30. Watson G.S., Enkin R.J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // *Geophysical Research Letters*. 1993. Vol. 20. Iss. 19. P. 2135–2137. <https://doi.org/10.1029/93GL01901>.
31. Винарский Я.С., Житков А.Н., Кравчинский А.Я. Алгоритмы и программы. Вып. 10 (99): Автоматизированная система обработки палеомагнитных данных ОПАЛ. М.: ВИЭМС, 1987. 89 с.
32. Кравчинский А.Я., Житков А.Н., Винарский Я.С., Кравчинский В.А., Константинов К.М. Применение системы ОПАЛ-1 при палеомагнитных исследованиях // *Магнитные свойства минералов и проблемы палеомагнетизма и петромагнетизма: сб. науч. тр. Магадан: СКВНИИ ДВО АН СССР, 1990. С. 191.*
33. Константинов К.М. Способ реконструкции последовательности тектонических дислокаций горных пород по векторам естественной остаточной намагниченности // *Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: материалы семинара (г. Борок, 11–13 октября 2003 г.)*. М.: ГЕОС, 2003. С. 32–34.
34. Константинов К.М. Математическое моделирование сложных деформаций горных пород по векторам характеристической естественной остаточной намагниченности // *Геофизика*. 2005. № 6. С. 60–65. EDN: SQRDOL.
35. Завойский В.Н. Использование тензора магнитной восприимчивости для решения задач структурной геологии // *Физика Земли*. 1982. № 3. С. 76–84.
36. Константинов К.М., Артёмова Е.В., Константинов И.К., Яковлев А.А., Киргуев А.А. Возможности метода анизотропии магнитной восприимчивости в решении геолого-геофизических задач поисков коренных месторождений алмазов. *Геофизика*. 2018. № 1. С. 67–77. EDN: YWMSHU.
37. Tarling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall, 1993. 217 p.

References

1. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 192 p. (In Russ.).
2. Konstantinov K.M. Dynamic physical-geological models in solving geological-geophysical problems. *Voprosy estestvoznaniya*. 2017;1:55-63. (In Russ.). EDN: ZOWRVF.
3. Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., Antonova T.A., Konstantinov I.K., Ibragimov S.Z., Artemova E.V. Petro- and paleomagnetic characteristics of the structural–material complexes of the diamond mining of the Nyurbinskaya pipe (Middle Markha district, West Yakutia). *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(1):135-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0235>. EDN: YPOZID.
4. Konstantinov K.M., Shibeko E.A., Shulga V.V. Regional dynamic physical-geological model of the Siberian platform in Late Devonian – Early Carboniferous periods: establishing of parasteric correlation between kimberlite and hydrocarbon formations. *Geofizika = Geophysics*. 2020;3:62-71. (In Russ.). EDN: XPKXTP.
5. Vine F., Matthews D. Magnetic anomalies over oceanic ridges. In: Zonenshain L.P., Kovalev A.A. (eds.). *Novaya global'naya tektonika (tektonika plit) = New global tectonics (plate tectonics)*. Moscow: Mir; 1974, p. 32-37. (In Russ.).
6. Khranov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevskii S.A., Pogarskaya I.A., Rzhnevskii Yu.S., et al. *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 1982, 312 p. (In Russ.).
7. Kravchinskii A.Ya. *Paleomagnetic and paleogeographic rearrangements on Rrecambrian platforms*. Moscow: Nedra; 1977, 95 p. (In Russ.).
8. Kravchinskii A.Ya. *Paleomagnetism and paleogeographic evolution of continents*. Novosibirsk: Nauka; 1979, 264 p. (In Russ.).
9. Scotese C.R., McKerrow W.S. Revised World maps and introduction. *Geological Society, London, Memoirs*. 1990;12:1-21. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.1990.012.01.01>.
10. Zhandalinov V.M., Konstantinov K.M. Electrodynamic and geodynamic aspects of kimberlite formation. *Nauka i obrazovanie*. 2011;1:45-50. (In Russ.). EDN: NEEWTH.



11. Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A. Paleomagnetism of Middle Paleozoic mafic rocks of the southeastern side of the Vilyui paleorift. *Doklady Akademii nauk*. 2019;486(5):607-612. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-56524865607-612>. EDN: OQAUEM.
12. Konstantinov K.M., Khoroshikh M.S., Starkova T.S., Liskovaya L.V., Kuzina D.M. Minerals of the natural remanent magnetization of kimberlites of the pipe Nyurbinskaya (Yakut diamondiferous province). *Geofizika = Geophysics*. 2019;3:15-26. (In Russ.). EDN: NAUXVQ.
13. Butler R.F. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terrains*. Oxford: Backwell Sci. Publ.; 1992, 319 p.
14. Zijdeveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: Collinson D.W., Creer K.M., Runcorn S.K. (eds.). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, p. 254-286.
15. Zhitkov A.N. Mathematical apparatus of spatial rotations in the problems of paleomagnetology and geodynamics. In: *Geofizicheskie issledovaniya Vostochnoi Sibiri na sovremennom etape = Geophysical studies of Eastern Siberia at the present stage*. Irkutsk: East Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1990, p. 110-129. (In Russ.).
16. Zhitkov A.N., Vinarskii Ya.S. Matrix apparatus of spatial rotations in paleomagnetological problems. In: *Obespechenie nauchno-tekhnicheskogo progressa pri geofizicheskikh issledovaniyakh v Vostochnoi Sibiri = Provision of scientific and technical progress in geophysical research in Eastern Siberia*. Irkutsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1987, p. 139-141. (In Russ.).
17. Khramov A.N., Sholpo L.E. *Palaeomagnetism: principles, methods and geological applications of paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 1967, 251 p. (In Russ.).
18. Fisher R.A. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society A*. 1953;217(1130):295-305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
19. Shipunov S.V. Identification of components of multicomponent natural remanent magnetization during paleomagnetic studies. In: Khramov A.N. (eds.). *Paleomagnetizm i akkretionnaya tektonika = Paleomagnetism and accretionary tectonics*. Leningrad: All-Russian Petroleum Research and Exploration Institute; 1988, p. 173-185. (In Russ.).
20. Bazhenov M.L., Shipunov S.V. Fold method in paleomagnetism. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1988;7:89-101. (In Russ.).
21. Shipunov S.V. New fold test in paleomagnetism (alignment test rehabilitation). *Fizika Zemli*. 1995;4:67-74. (In Russ.).
22. Shipunov S.V. Synfolding magnetization: detection, testing and geological applications. *Geophysical Journal International*. 1997;130(2):405-410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05656.x>.
23. Bazhenov M.L., Shipunov S.V. Fold test in paleomagnetism: new approaches and reappraisal of data. *Earth and Planetary Science Letters*. 1991;104(1):16-24. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90233-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90233-8).
24. Enkin R.J. The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;212(1-2):151-166. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00238-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00238-3).
25. Graham J.W. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research*. 1949;54(2):131-167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
26. McFadden P.L. A new fold test for palaeomagnetic studies. *Geophysical Journal International*. 1990;103(1):163-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01761.x>.
27. McFadden P.L., Jones D.L. The fold test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1981;67(1):53-58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02731.x>.
28. McElhinny M.W. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1964;8(3):338-340. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1964.tb06300.x>.
29. Watson G.S. A test for randomness of directions. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1956;7(4):160-161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1956.tb05561.x>.
30. Watson G.S., Enkin R.J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. *Geophysical Research Letters*. 1993;20(19):2135-2137. <https://doi.org/10.1029/93GL01901>.
31. Vinarskii Ya.S., Zhitkov A.N., Kravchinskii A.Ya. *Algorithms and programs*. Iss. 10 (99): *OPAL automated system for processing paleomagnetic data*. Moscow: All-Union Institute of Economy of Mineral Raw Materials and Geological Exploration; 1987, 89 p. (In Russ.).
32. Kravchinskii A.Ya., Zhitkov A.N., Vinarskii Ya.S., Kravchinskii V.A., Konstantinov K.M. OPAL-1 system application in paleomagnetic studies. In: *Magnitnye svoystva mineralov i problemy paleomagnetizma i petromagnetizma = Magnetic properties of minerals and problems of paleomagnetism and petromagnetism*. Magadan: North-Eastern Integrated Research Institute of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990, p. 191. (In Russ.).
33. Konstantinov K.M. Reconstruction method of rock tectonic dislocation sequence by the vectors of natural remanent magnetization. In: *Paleomagnetizm i magnetizm gornyykh porod: materialy seminara = Paleomagnetism and magnetism of rocks: proceedings of the seminar*. 11–13 October 2003, Borok. Moscow: GEOS; 2003, p. 32-34. (In Russ.).
34. Konstantinov K.M. Mathematical modeling of complex rock deformations by vectors of characteristic natural remanent magnetization. *Geofizika = Geophysics*. 2005;6:60-65. (In Russ.). EDN: SQRDOL.
35. Zavoiskii V.N. Using magnetic susceptibility tensor to solve structural geology problems. *Fizika Zemli*. 1982;3:76-84. (In Russ.).



36. Konstantinov K.M., Artemova E.V., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Kirguez A.A. Possibilities of the method of anisotropy of magnetic susceptibility in the solution of geologic-geophysical problems of search radical diamond fields. *Geofizika = Geophysics*. 2018;1:67-77. (In Russ.). EDN: YWMSHU.

37. Tarling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall; 1993, 217 p.

Информация об авторе / Information about the author



Константинов Константин Михайлович,

доктор геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

старший научный сотрудник Лаборатории геологии месторождений,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

Konstantin M. Konstantinov,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

Senior Researcher of the Mining Geology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,

✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.08.2023; одобрена после рецензирования 04.09.2023; принята к публикации 20.09.2023.

The article was submitted 14.08.2023; approved after reviewing 04.09.2023; accepted for publication 20.09.2023.