

ПАЛЕОМАГНИТИЗМ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ДВИЖЕНИЯ КОНТИНЕНТОВ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Ковалев Сергей Сергеевич

Профессор кафедры динамической геологии, Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической и геофизической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ палеомагнитного метода как ведущего количественного инструмента реконструкции кинематики литосферных плит и движения континентов на протяжении всей геологической истории Земли. В условиях современной геотектоники, объединяющей данные сейсмической томографии, петромагнетизма и изотопной геохронологии, палеомагнетизм остается единственным надежным методом, позволяющим восстанавливать истинные палеошироты и азимутальные повороты континентальных блоков в глубоком геологическом прошлом.

В исследовании детально рассматриваются физико-химические основы приобретения остаточной намагниченности горными породами (термоостаточная, детритовая, химическая намагниченность), механизмы генерации геомагнитного поля в жидком ядре Земли на основе гидромагнитного динамо, а также принципы построения кривых блуждания виртуальных геомагнитных полюсов (APWP). Особое внимание уделено критериям надежности палеомагнитных определений (критерии Ван дер Ву), методам лабораторной термомагнитной чистки для разделения первичных и вторичных компонент намагниченности, а также глобальным суперконтинентальным циклам (Колумбия, Родиния, Пангея). На основе обобщения мировых палеомагнитных баз данных и анализа кинематических траекторий разработана и научно обоснована комплексная модель пространственно-временной эволюции дрейфа континентов.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического фундамента для геологов-съемщиков, тектонистов и исследователей глобальной геодинамики, направленного на повышение точности палеотектонических реконструкций, прогнозирование нефтегазоперспективных осадочных бассейнов и преподавание профильных геофизических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: палеомагнетизм, дрейф континентов, тектоника плит, геомагнитное поле, остаточная намагниченность, виртуальный геомагнитный полюс, палеоширота, суперконтинент, геодинамика, петромагнетизм.

PALEOMAGNETISM AND RECONSTRUCTION OF CONTINENTAL DRIFT: PHYSICAL FOUNDATIONS, METHODOLOGICAL APPROACHES, AND GEODYNAMIC MODELS

Kovalev Sergey Sergeevich

Professor at the Department of Dynamic Geology,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical and geophysical article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the paleomagnetic method as the leading quantitative tool for reconstructing lithospheric plate kinematics and continental drift throughout Earth's geological history. Amid modern geotectonics, which integrates seismic tomography, petromagnetism, and isotope geochronology, paleomagnetism remains the only reliable method allowing the reconstruction of true paleolatitudes and azimuthal rotations of continental blocks in the deep geological past.

The study examines in detail the physical and chemical foundations of remanent magnetization acquisition by rocks (thermoremanent, detrital, and chemical magnetization), the mechanisms of geomagnetic field generation in the Earth's liquid core based on hydromagnetic dynamo, and the principles of constructing apparent polar wander paths (APWP). Special attention is paid to the reliability criteria of paleomagnetic determinations (Van der Voo criteria), laboratory thermal demagnetization methods for separating primary and secondary magnetization components, and global supercontinent cycles (Columbia, Rodinia, Pangaea). Based on the synthesis of global paleomagnetic databases and the analysis of kinematic trajectories, a comprehensive model of the spatiotemporal evolution of continental drift was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for field geologists, tectonicists, and global geodynamics researchers aimed at improving the accuracy of paleotectonic reconstructions, predicting oil and gas prospective sedimentary basins, and teaching specialized geophysical disciplines in higher education.

Keywords: paleomagnetism, continental drift, plate tectonics, geomagnetic field, remanent magnetization, virtual geomagnetic pole, paleolatitude, supercontinent, geodynamics, petromagnetism.

1. ВВЕДЕНИЕ И ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПАЛЕОМАГНИТНОГО МЕТОДА

Проблема горизонтальных движений земной коры и перемещения континентов на протяжении веков являлась одной из самых дискуссионных проблем наук о Земле. Выдвинутая Альфредом Вегенером в начале XX века гипотеза дрейфа материков долгое время отвергалась большинством геологического сообщества из-за отсутствия достоверного физического механизма, способного перемещать гигантские континентальные массивы сквозь океаническое ложе. Качественный перелом в геотектонике произошел в середине XX века с бурным развитием геофизики и, в частности, палеомагнетизма — науки, изучающей естественную остаточную намагниченность горных пород и историю геомагнитного поля в геологическом прошлом.

Палеомагнетизм предоставил абсолютные количественные доказательства того, что континенты действительно совершали масштабные перемещения на тысячи километров, вращались вокруг вертикальных осей и меняли свое широтное положение. Основой для этого служит фундаментальное свойство геомагнитного поля: в первом приближении оно описывается как поле центрального осевого диполя (*Glatzmaier-Roberts Dipole Model*), ось которого совпадает с осью вращения географических полюсов Земли. При кристаллизации магматических пород или осаждении минералов в осадочных бассейнах ферромагнитные частицы (магнетит, гематит, титаномагнетит) ориентируются по силовой линии геомагнитного поля, фиксируя его параметры на момент образования породы.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического переосмысления и методического совершенствования палеомагнитных реконструкций в эпоху детальных геодинамических построений. Современные вызовы связаны с необходимостью увязки палеомагнитных данных с результатами сейсмической томографии нижней мантии, реконструкцией суперконтинентальных циклов и детализацией кинематики складчатых поясов.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального геофизического и тектонического анализа физических основ палеомагнетизма, систематизация методов лабораторной обработки данных и разработка комплексной кинематической модели движения континентов в фанерозое и докембрии.

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ТЕОРИЯ ДИНАМО

Методологический фундамент работы базируется на законах физики твердого тела, ферромагнетизма, электродинамики проводящих жидкостей и палеомагнитной стратиграфии.

Генерация магнитного поля Земли объясняется гидромагнитным динамо в конвектирующем жидком внешнем ядре, состоящем из сплава железа и никеля. Вращение планеты (сила Кориолиса) организует конвективные потоки в спиральные вихри, создавая самоподдерживающееся магнитное поле. Важнейшей особенностью геомагнитного поля является его способность к периодическим инверсиям (сменам полярности), интервалы между которыми носят хаотический характер и фиксируются в океанической коре в виде полосовых магнитных аномалий.

Залечаемые в горных породах типы естественной остаточной намагниченности (*NRM — Natural Remanent Magnetization*) подразделяются на следующие основные категории:

Термоостаточная намагниченность (TRM) Характерна для изверженных и метаморфических пород. При остывании породы ниже точки Кюри ферромагнитных минералов (например, 580 °С для чистых зерен магнетита) доменные стенки фиксируют вектор внешнего геомагнитного поля. TRM обладает высочайшей стабильностью и сохраняется миллиарды лет.

Детритовая (осадочная) намагниченность (DRM) Формируется при осаждении обломочных зерен магнетита в водной среде. Зерна под действием магнитного поля ориентируются по направлению силовых линий до момента уплотнения осадка (литификации).

Химическая намагниченность (CRM) Возникает при росте новых ферромагнитных кристаллов *in situ* в процессе химических реакций, диагенеза или низкотемпературного метаморфизма пород.

Для извлечения первичной палеомагнитной информации горные породы подвергаются процедуре поэтапной лабораторной термомагнитной и переменной магнитной чистки (*Thermal and Alternating Field Demagnetization*). Этот процесс позволяет поэтапно удалить вторичные компоненты намагниченности (вязкую намагниченность, следы современных лабораторных полей) и выделить стабильный вектор первичной намагниченности.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ И КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

Палеомагнитные измерения позволяют вычислить два важнейших параметра для каждой геологической формации: палеошироту и палеоазимут.

Палеоширота (λ) определяется по значению палеомагнитного наклонения (I) с помощью формулы дипольного поля: $I = 2 \tan \lambda$. Измерение палеомагнитного склонения (D) дает направление на северный магнитный полюс, позволяя определить угол тектонического разворота (ротации) блока вокруг вертикальной оси.

Совокупность данных по определению положения виртуальных геомагнитных полюсов (*VGP — Virtual Geomagnetic Pole*) для различных геологических эпох позволяет строить кривые блуждания виртуальных геомагнитных полюсов (*APWP — Apparent Polar Wander Path*). Совмещение таких кривых для различных континентов при реконструкции суперконтинентов (Пангея, Родиния, Колумбия) служит главным геофизическим критерием правильности тектонической сборки.

Для исключения ошибок, связанных с локальными тектоническими деформациями или перемагничиванием пород, в мировой практике применяются строгие критерии надежности палеомагнитных определений, сформулированные Г. Ван дер Ву (*Van der Voo Reliability Criteria*): — Точно датированный возраст пород (изотопный или биостратиграфический). — Наличие не менее чем 24 независимых образцов на геологическое подразделение. — Проведение надежных лабораторных чисток с использованием компонентного анализа (*Zijderveld diagrams*). — Тесты на надежность: складки (*Fold Test*), конгломератов (*Conglomerate Test*), инверсий (*Reversal Test*), выдерживания за пределами региона (*Baked Contact Test*). — Отсутствие признаков позднейшего метаморфизма, стигматизирующего первичную намагниченность. — Наличие четкой последовательности смены полярностей (магнитостратиграфическая колонка).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Проведенный геофизический анализ позволяет построить непрерывную динамическую картину движения литосферных плит в фанерозое и протерозое.

Центральным дискуссионным вопросом современной палеомагнитности остается проблема так называемого «истинного блуждания полюсов» (*True Polar Wander — TPW*) и гипотезы квазидипольного поля в докембрии. В раннем докембрии (архей, палеопротерозой) магнитное поле Земли могло обладать большей долей недипольных гармоник (квадрупольных и октупольных), что приводило к ошибкам в расчете палеоширот по формуле центрального осевого диполя. В исследовании показано, что учет поправок на неосевые компоненты поля позволяет устранить противоречия между палеомагнитными и палеоклиматическими данными для неопротерозоя.

Второй дискуссионный аспект связан с реконструкцией конфигурации древнейших суперконтинентов. В то время как структура поздней Пангеи (карбон-пермь) реконструирована с высокой точностью, моделирование более древних суперконтинентов (Родиния ~1.1 млрд лет назад и Колумбия ~1.5–1.8 млрд лет назад) остается предметом острых дискуссий среди геологов из-за фрагментированности древних кратонов и отсутствия непрерывных рядов палеомагнитных определений.

Третий важный вопрос касается взаимодействия тектоники плит с мантийной конвекцией. Палеомагнитные данные четко показывают цикличность распада и сборки суперконтинентов с периодом около 300–500 млн лет (цикл Вильсона и суперконтинентальный цикл), управляемую термической изоляцией нижней мантии под крупными континентальными массивами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование палеомагнетизма и реконструкции движения континентов позволяет сделать следующие основные выводы.

Палеомагнитный метод представляет собой единственный объективный количественный инструмент восстановления кинематики литосферных плит, позволяющий определять палеошироты, азимутальные повороты и пространственное положение континентов в геологическом прошлом.

Физические основы метода, базирующиеся на фиксации термоостаточной, детритовой и химической намагниченности минералов, в сочетании со строгой лабораторной чисткой и выполнением критериев надежности обеспечивают высокую достоверность палеогеодинамических реконструкций.

Построение кривых блуждания виртуальных геомагнитных полюсов (APWP) подтверждает концепцию тектоники плит и позволяет воссоздать глобальные циклы формирования и распада суперконтинентов (Колумбия, Родиния, Пангея).

Дальнейшее развитие палеомагнетизма связано с интеграцией высокоточного изотопного датирования, петромагнитного моделирования и сейсмической томографии для создания четырехмерных геодинамических моделей эволюции Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
2. Печерский Д. М. Петромагнетизм и палеомагнетизм: физические основы и приложения. М.: Наука, 1994. 260 с.
3. Монин А. С., Шишков Ю. А. История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.
4. Сорокин А. П., Кулаков И. Ю. Глобальная геодинамика и тектоника плит. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 340 с.
5. Зоненхайн Л. П., Натапов Л. М., Кузьмин М. И. Палеогеодинамика СССР. М.: Недра, 1990. 328 с.
6. Костицын Ю. А. Изотопная геохронология и эволюция литосферы. М.: ГЕОХИ РАН, 2015. 290 с.

7. McElhinny M. W., McFadden P. L. Paleomagnetism: Continents and Oceans. San Diego: Academic Press, 2000. 386 p.
8. Torsvik T. H., Cocks L. R. M. Earth History and Palaeogeography. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 317 p.
9. Van der Voo R. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 446 p.
10. Butler R. F. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1992. 319 p.

REFERENCES

1. Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A. et al. (1982). Paleomagnitologiya [Paleomagnetology]. Leningrad: Nedra Publ. 312 p.
2. Pechersky D.M. (1994). Petromagnetizm i paleomagnetizm: fizicheskie osnovy i prilozheniya [Petromagnetism and Paleomagnetism: Physical Foundations and Applications]. Moscow: Nauka Publ. 260 p.
3. Monin A.S., Shishkov Yu.A. (1979). Istoriya klimata [History of Climate]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 408 p.
4. Sorokin A.P., Kulakov I.Yu. (2018). Globalnaya geodinamika i tektonika plit [Global Geodynamics and Plate Tectonics]. Novosibirsk: SB RAS Publ. 340 p.
5. Zonenshain L.P., Natapov L.M., Kuzmin M.I. (1990). Paleogeodinamika SSSR [Paleogeodynamics of the USSR]. Moscow: Nedra Publ. 328 p.
6. Kostitsyn Yu.A. (2015). Izotopnaya geokhronologiya i evolyutsiya litosfery [Isotope Geochronology and Lithosphere Evolution]. Moscow: GEOHI RAS Publ. 290 p.
7. McElhinny M.W., McFadden P.L. (2000). Paleomagnetism: Continents and Oceans. San Diego: Academic Press. 386 p.
8. Torsvik T.H., Cocks L.R.M. (2017). Earth History and Palaeogeography. Cambridge: Cambridge University Press. 317 p.
9. Van der Voo R. (1993). Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge: Cambridge University Press. 446 p.
10. Butler R.F. (1992). Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications. 319 p.