

Проблемы палеомагнетизма докембрия территории Украины

В. Г. Бахмутов, Е. Б. Поляченко, С. И. Черкес, 2018

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
Киев, Украина

Поступила 24 сентября 2018 г.

Розглянуто деякі проблемні питання, пов'язані з палеомагнітними дослідженнями докембрійських порід на території України. Проаналізовано результати палеомагнітних досліджень протерозойських порід Українського щита, трапової формації Волині та осадового венду Поділля. Здавалося б, з появою численних нових визначень абсолютного віку порід щита з'явилися нові можливості для отримання надійних палеомагнітних полюсів. Однак дослідження пілотних колекцій зразків з деяких опорних відслонень у Середньопридніпровському, Приазовському, Дністровсько-Бузькому, Інгульському і Північно-Західному мегаблоках щита, для яких надійно визначено геохронологічний вік, показали їх палеомагнітну неінформативність. У межах щита палеомагнітно інформативними є породи габро-анортозитової формації, зокрема породи Інгульського мегаблока, у межах Корсунь-Новомиргородського плутону і Новоукраїнського масиву — відповідно габро-анортозити і граніти рапаківі, а також у межах коростенського комплексу у північно-західній частині щита — анортозити і габро-анортозити. На шести об'єктах віком 1750 млн років у межах Інгульського мегаблока визначено палеомагнітний полюс ($\Phi = 22,7^\circ \text{ N}$, $\Lambda = 164,3^\circ \text{ E}$, $dp/dm = 4,9^\circ/9,6^\circ$). На підставі аналізу палеомагнітних полюсів для Фенноскандії і Українського щита побудовано модель взаємного розташування цих блоків 1770 і 1750 млн років тому. Близько 1770 млн років тому Фенноскандія і Український щит займали палеошироту 15° N і 2° S відповідно. При цьому щит був повернений щодо Фенноскандії на 40° проти годинникової стрілки щодо його сучасного положення в складі Східноєвропейської платформи. За подальші 20 млн років Фенноскандія і Український щит дрейфували у південному напрямку приблизно на 5° і зайняли палеошироту 10° N і 7° S відповідно, при цьому обертання блоків майже не відбувалося. Середня швидкість широтного дрейфу для обох блоків становила близько 2,8 см/рік. Наведено нові результати палеомагнітних досліджень базальтів ратненської світи Волині, згідно з якими можна припускати, що в едіакарії геометрія геомагнітного поля відрізнялася від дипольної. У межах тестування цієї гіпотези передбачаються вивчення повного розрізу трапової формації по свердловинах і магніостратиграфічне вивчення осадових відкладів венда—кембрію Поділля з метою отримання фактичного матеріалу про частоту інверсії.

Ключові слова: палеомагнетизм, Український щит, Інгульський мегаблок, трапи Волині, венд Поділля.

Введение. Изучение геомагнитного поля как физического феномена является важным направлением в познании окружающего мира. Восстановление эволюции магнитного поля Земли актуально для решения многих проблем в области наук о

Земле, среди которых можно выделить следующие аспекты: теоретический — для разработки физической теории геомагнетизма; мировоззренческий — как важное направление в познания окружающего мира; фундаментальный геологический —

как основа для решения многих фундаментальных задач наук о Земле (стратиграфии, геохронологии, палеогеографии, тектоники); глубинный — изучение процессов, происходящих во внутренних оболочках Земли, и их связи с важнейшими геологическими событиями; прикладной геологический — решение задач прикладной геологии; экологический — для понимания связи геомагнитного поля с изменениями окружающей среды и климата, получения адекватного представления о таких изменениях в прошлом и для их прогнозирования в будущем.

Знания об эволюции геомагнитного поля на протяжении геологической истории Земли ученые получают благодаря феномену палеомагнетизма — физическому явлению, заключающемуся в фиксации и сохранении направления и величины древнего геомагнитного поля магнитными минералами горных пород в виде остаточной намагниченности. В основе палеомагнитного метода исследований горных пород лежат три гипотезы: фиксации — горные породы при образовании намагничиваются по направлению геомагнитного поля времени и места их образования; сохранения — приобретенная первичная намагниченность сохраняется (хотя бы частично) в породе в геологическом масштабе времени и может быть выделена из суммарной многокомпонентной остаточной намагниченности породы; центрального осевого диполя (ЦОД) — геомагнитное поле, усредненное за промежутки времени более 100 000 лет (кроме эпох инверсий), является полем диполя, расположенного в центре Земли и ориентированного по ее оси вращения.

Существует четыре основных параметра, по которым ученые могут судить об эволюции геомагнитного поля на протяжении геологической истории нашей планеты. Это характер изменения полярности геомагнитного поля, его напряженность, геометрия поля (соотношение дипольных и недипольных компонент), амплитуда вековых вариаций.

Большая часть наших знаний о геомаг-

нитном поле ограничена фанерозоем, в то время как протерозой, охватывающий намного больший временной интервал, во многом остается "белым пятном" (рис. 1). Для фанерозоя основным инструментом изучения характера изменения магнитного поля является построение шкалы геомагнитной полярности [Gradstein et al., 2012]. Если сравнить общее количество определений в мировых базах данных [Jarboe et al., 2012; Veikkolainen et al., 2014], то для фанерозоя оно составляет ~8500 [Jarboe et al., 2012], а для докембрия — около 3500 (около 200 из них для архея, ~400 — палеопротерозоя, ~2000 — мезопротерозоя и ~900 — неопротерозоя). С учетом продолжительности докембрия и фанерозоя очевидно, что докембрийских данных относительно немного (см. рис. 1).

В данной статье рассмотрены некоторые проблемные вопросы, связанные с палеомагнитными исследованиями докембрийских пород, и приведены некоторые конкретные примеры результатов палеомагнитных исследований протерозойских пород Украинского щита (УЩ).

Палеомагнитный метод в решении задач палеогеодинамики. Как упоминалось во введении, феномен палеомагнетизма позволяет получить информацию о древнем геомагнитном поле, "запись" которого сохранилась в остаточной намагниченности горных пород. Уже на протяжении полувека изменения полярности геомагнитного поля используются для создания геомагнитной временной шкалы (магнитостратиграфия и магнитохронология), документирования спрединга морского дна, тестирования гипотезы тектоники плит и реконструкции древних суперконтинентов. Палеомагнитным данным отводится приоритетная роль при глобальных палеогеодинамических реконструкциях, поскольку они позволяют количественно интерпретировать перемещения и вращения отдельных блоков земной коры и являются своего рода каркасом, в который должны укладываться модели дрейфа литосферных плит, процессы их консолидации и события на их окраинах. Кроме того, па-

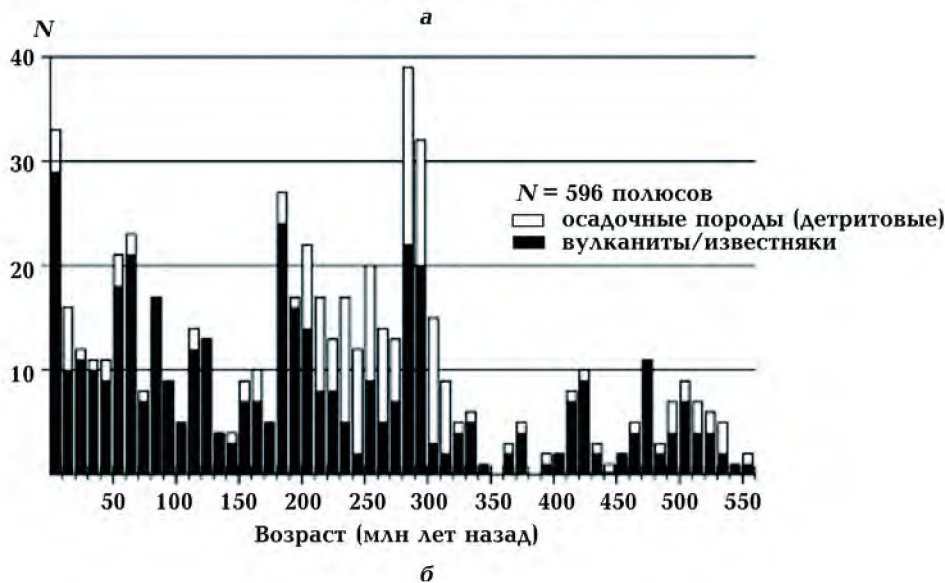
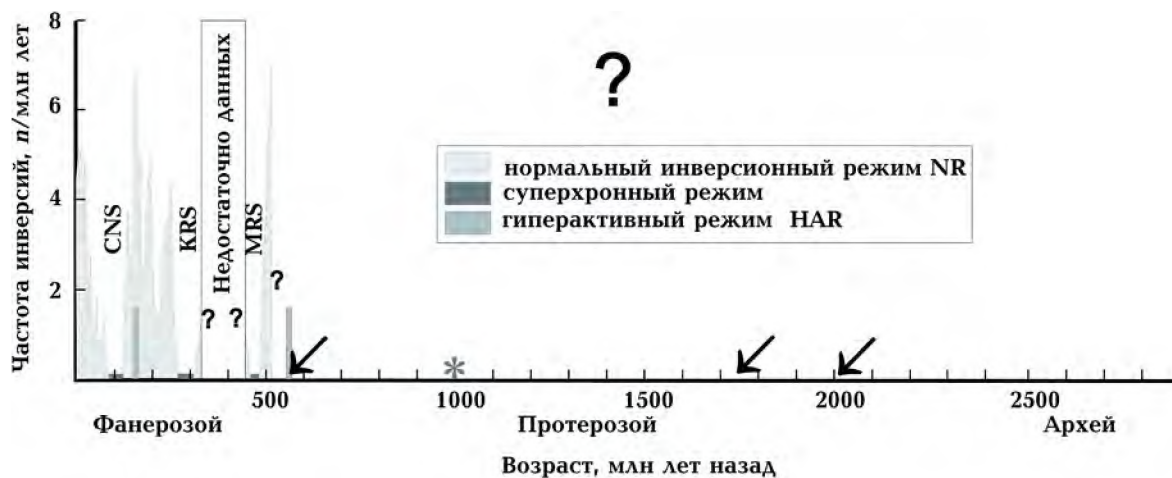


Рис. 1. Схематическое изображение эволюции инверсионного процесса геодинамо в фанерозое (на основе материалов [Gallet et al., 2012; Галле, Павлов, 2016]). Смена режимов работы геодинамо показана оттенками серого. Обозначения фанерозойских суперхронов: CNS — меловой нормальный (84-121Ma), KRS — Киама (пермо-карбонный обратный), MRS — Мойеро (ордовик, обратный). Звездочка — суперхрон Мая. Отдельные данные по изменению частоты инверсий в протерозое не приводятся. Черными стрелками показаны временные интервалы, результаты по которым обсуждаются в данной статье (а); наиболее надежные палеомагнитные определения по компиляции из Мировой базы данных и литературных источников в соответствии с выборкой из табл. 1, по [Torsvik et al., 2012], по осадочным породам и по вулканогенным породам/известнякам (б).

леомагнитные данные способствуют решению геологических задач, среди которых можно назвать синхронизацию и корреляцию магматических явлений на консолидированных участках платформ, выяснение условий тепловой истории метаморфизма горных пород, исследование динамических аспектов тектоники блоков земной коры, палеотектонические рекон-

струкции разных масштабов (от глобальных до локальных) и др.

Для построения палеогеодинамических моделей за длительные геологические временные интервалы палеомагнитные данные представляют в виде палеополюсов, которые рассчитываются, принимая а priori гипотезу ЦОД. Палеомагнитные полюсы, определенные для разных времен-

ных интервалов, являются основой для построения траектории кажущейся миграции полюса (ТКМП, APWP). Последняя, будучи отражением дрейфа тектонических плит, позволяет получить численные оценки движения тектонических блоков для разных периодов геологической истории. В общем случае ТКМП — это график последовательных положений палеомагнитных полюсов, рассчитанных для одного континента, обычно приведенный в современной географической системе координат. Эта техника была введена К. Криром [Creer et al., 1954] и стала стандартным методом представления палеомагнитных данных, охватывающих длительные геологические интервалы.

Когда в 1960-х годах были построены первые ТКМП, казалось, что кажущаяся полярная миграция происходит в значительной степени из-за вращения Земли как целого, известное как истинная миграция (блуждание) полюса. Позднее стало понятно, что главная часть кажущейся полярной миграции обусловлена движением литосферных плит.

Если относительные позиции разных континентов достаточно хорошо известны, палеомагнитные данные по этим континентам могут быть объединены в глобальную ТКМП (GAPWAP). Такие наиболее широко известные компиляции по [Besse, Courtillot, 2002] охватывают последние 200 млн лет, а в работах [Torsvik et al., 2008, 2012] для отдельных блоков — весь фанерозой. По палеомагнитным реконструкциям определяют древние широты и относительную ориентацию (вращение) континентов (но не их палеодолготы), что дает определенную степень свободы в принятии тех или иных палеогеографических моделей.

Существуют разные способы построения ТКМП, основанные на разных видах сглаживания и подбора аппроксимирующей зависимости. На сегодня ТКМП построены практически для всех фанерозойских континентальных блоков, но даже из рис. 1, б очевидно, что с удревнением возраста уменьшается количество

данных, и их распределение крайне неравномерно, особенно для нижнего—среднего палеозоя. Поэтому связь фанерозойских ТКМП с протерозойскими фрагментами траекторий зачастую довольно проблематична. Относительно небольшое количество известных докембрийских объектов, "пригодных" для проведения палеомагнитных исследований, а также надежных определений возраста пород современными изотопно-геохронологическими методами определяет чрезвычайную актуальность проблемы построения ТКМП для докембрия (для любого кратона).

Создание Базы палеомагнитных данных значительно повлияло на становление современных представлений о кинематике крупных литосферных блоков. Приоритет в размещении материалов в Базе предоставляется наиболее надежным определениям, удовлетворяющим современным критериям достоверности. Одним из первых шагов при построении кривых ТКМП является селекция имеющихся палеомагнитных определений по тем или иным параметрам (критериям, условиям), характеризующим их надежность и достоверность [Van der Voo, 1990; Печерский, Диденко, 1995; Pisarevsky, McElhinny, 2003;]. Палеомагнитологами разработан целый ряд соответствующих критериев, самые существенные из них — наличие надежных изотопных датировок возраста пород и доказательство первичности исследуемой природной намагниченности. Первичность выделяемой характеристической компоненты обосновывается, прежде всего, полевыми методами (тесты складки, обращения, контакта). Также важен тщательный анализ всех возможных факторов, которые могут повлиять на результат исследования остаточной намагниченности. Палеомагнитные направления и полюсы, которые лежат в основе построения ТКМП, всегда приводятся с некоторыми угловыми характеристиками точности их определения и стратиграфической (геохронологической) привязкой.

Следует отметить, что и на сегодня степень разработки кривых ТКМП существ-

венно различается для разных кратонов, особенно для докембрийских. Хотя за последние два десятилетия получено большое количество новых определений, соответствующих современным критериям надежности, уровень разработки этой проблемы до последнего времени нельзя признать удовлетворительным. Это относится и к Восточно-Европейской платформе (ВЕП), которая по степени детальной тектонической изученности занимает одно из ключевых мест в реконструкциях суперконтинентов, особенно для докембрия.

В состав ВЕП входят Фенноскандия, Волго-Уралия и Сарматия, при этом каждый фрагмент отличается своей эволюцией. Большая часть палеомагнитных определений для докембрия ВЕП (около 840) получена по породам Балтийского щита (Фенноскандия), значительно меньше — по Волго-Уралии (~100) и УЩ (~70). Более того, количество определений, имеющих критерий надежности $Q \geq 3$ и более [Van der Voo, 1990], что обычно принимается как нижняя граница для построения ТКМП, составляет всего 450 определений для всего докембрия и около 170 для палеопротерозоя. При этом на значительных временных интервалах определения для ВЕП отсутствуют (например, для палеопротерозоя Волго-Уралии).

В данном контексте важным является определение индивидуальных траекторий дрейфа отдельных сегментов ВЕП, их консолидации и возраста формирования УЩ как единого тектонического блока. Наиболее эффективно эту проблему можно решить с помощью комбинации палеомагнитных, тектонофизических и геохронологических исследований протерозойских пород в разных частях кратона.

Палеомагнетизм докембрия (на примере исследования пород УЩ). Для докембрия древние платформы — основные структурообразующие элементы земной коры. Поэтому построение кривых ТКМП для них стоит в ряду наиболее важных задач современной геологии и геофизики. Однако докембрийские породы, которые могли подвергаться нескольким циклам

тектономагматической активизации и метаморфизма, характеризуются сложной естественной остаточной намагниченностью (ЕОН), которая является суммой нескольких компонентов с разной палеомагнитной стабильностью (в зависимости от происхождения намагниченности и ее носителей). Один из аспектов проблемы палеомагнетизма докембрия — выделение первичной намагниченности, синхронной этапу формирования породы, и ее характерных магнитно-минералогических признаков. Благоприятны в этом отношении участки земной коры с продолжительным временем консолидации, в частности УЩ. Однако реконструкции, выполненные на количественной палеомагнитной основе для докембрийских пород УЩ, которые удовлетворяют современным критериям надежности, немногочисленны и неоднозначны, что обусловлено рядом причин. Во-первых, специфичность этих образований накладывает ряд ограничений на использование палеомагнитного метода, что выражается в проблематичности применения двух прямых полевых тестов палеомагнитной стабильности, разработанных для осадочных пород (тесты складки и конгломератов). К тому же критерии выбора стабильных в палеомагнитном отношении объектов были разработаны для фанерозойских пород (см., например, [Van der Voo, 1990; 1993]) и не всегда применимы при изучении докембрийских образований, которые претерпели метаморфизм. Во-вторых, большое значение для интерпретации палеомагнитных данных имеет точность геохронологических методов определения возраста пород. Можно привести примеры, когда новые датировки U-Pb методом по детритовым зернам циркона заставляли принципиально пересмотреть возраст пород, а с ним и интерпретацию палеомагнитных результатов. Кроме того, существует проблема различия температуры закрытия изотопной системы в минералах (например, U-Pb системы в цирконе 800—900 °С) и температуры Кюри ферромагнетика (например, для магнетита ~580 °С), что для медленно остывающего плутона может дать

существенную разницу между геохронологическим возрастом породы и возрастом формирования в ней термоостаточной намагниченности. В-третьих, распределение палеомагнитных определений для протерозойских пород древних щитов крайне неравномерно (см. Global Palaeomagnetic Data Base). Однако в настоящее время альтернативы палеомагнитному методу для количественных оценок перемещения блоков земной коры нет, а применение новой аппаратуры и методов обработки данных в последние два десятилетия привело к активному использованию результатов палеомагнитного метода в геодинамике.

В пределах ВЕП палеомагнитные исследования начались в середине 1960-х годов, в частности под руководством А. Н. Храмова [Палеомагнитология ..., 1982]. Следует отметить большой объем работ, выполненный в конце прошлого столетия сотрудниками Института геофизики НАН Украины Н. П. Михайловой, А. М. Глеваской, С. Н. Кравченко и др., основные результаты которых опубликованы в работах [Михайлова, 1982; Михайлова, Глеваская, 1989; Михайлова и др., 1994; Elming et al., 1993, 1998, 2001, 2010]. Были получены магнитные и палеомагнитные характеристики большинства разновидностей основных и кислых магматических пород докембрийского возраста. Среди них были выделены палеомагнитно информативные разновидности (анортозиты, монзониты, некоторые граниты), в которых сохранилась первичная компонента ЕОН. Также была показана информативность некоторых пород дайкового гипабиссального комплекса, которые являются отражением важных элементов магматической и тектонической истории любого региона и особенно щитов, в том числе УЩ.

Анализируя современное состояние палеомагнитных определений для УЩ, с учетом полученных нами результатов, необходимо отметить единое мнение разных исследователей относительно палеомагнитной информативности как некоторых разновидностей основных магматических пород УЩ, представленных анортозитами и

габбро-анортозитами, так и пород дайкового гипабиссального комплекса. Также следует отметить существенный прогресс геохронологических методов определения возраста этих пород (см., например, [Shumlyansky et al., 2017]). Это открывает новые возможности для разработки моделей отдельных сегментов ТКМП для УЩ в протерозое.

Кроме того, проведенные исследования пород из разных магаблоков УЩ, по которым получены надежные определения возраста, показали их палеомагнитную неинформативность, т. е. невозможность выделения направлений древних компонент остаточной намагниченности. Это относится к Мокромосковскому массиву Среднеприднепровского блока, где образцы отбирались в Янцевском Карьере из серых мелкозернистых двуслюдяных гранитов, U-Pb изотопный возраст которых по единичным зернам циркона определен 2827 ± 7 млн лет [Щербак и др., 2005]. Палеомагнитно неинформативными оказались гранодиориты Осипенковского массива из Приазовского блока возрастом 2800 ± 30 млн лет [Артеменко та ін., 1985]. На Днестровского-Бугском блоке исследования проводились в карьере "Казачий яр". Породы карьера представлены эндербитами, которые прорваны серией долеритовых даек мощностью от 1,5 до 3 м, возраст пород 1950 ± 4 млн лет [Степанюк, 1996]. По предварительным результатам [Бахмутов, Иосифиди, 2010] по дайкам были выделены две высокотемпературные компоненты намагниченности, но последующий анализ показал, что одна из них связана с перемагничиванием (получено направление девонского полюса), а другая контролируется магнитной анизотропией (степень анизотропии составляет около 50 %).

Как информативные в палеомагнитном отношении были определены породы Ингульского мегаблока в центральной части УЩ в пределах Корсунь-Новомиргородского плутона и Новоукраинского массива, представленные соответственно габбро-анортозитами и гранитами рапакиви,

а также породы Коростенского комплекса в северо-западной части УЩ, представленные анортозитами и габбро-анортозитами. Это согласуется с оценками предыдущих исследований, выполненных в пределах этих комплексов УЩ [Михайлова, 1982; Михайлова, Глеваская, 1989; Михайлова и др., 1994; Elming et al., 1993, 1998, 2001, 2010].

В пределах Ингульского мегаблока информативными оказались образцы, отобранные на девяти объектах (сайтах), обработанные по стандартной палеомагнитной методике [Палеомагнитология ..., 1982]. Результаты по определению наиболее стабильной характеристической (ChRM) компоненты намагниченности приведены в табл. 1. На рис. 2, а приведены ее средние палеомагнитные направления, а на рис. 2, б представлены средние полюсы возрастом ~ 1750 и $2037,4 \pm 0,6$ млн лет (номера 10 и 17 в табл. 2).

В пределах Новомиргородского массива палеомагнитные направления, рассчитанные по ChRM-компоненте габбро-анортозитов и анортозитов карьеров Лекарево и Каменка, хорошо согласуются между собой (номера 5, 6, рис. 2, а) и с результатами предыдущих исследований этого массива [Михайлова и др., 1994, табл. 23]. В пределах Городищенского массива палеомагнитные направления, рассчитанные по ChRM-компонентам образцов анортозитов и габбро из карьеров Вязовок и Хлистуновка, также хорошо согласуются между собой (номера 3, 4 и 11) и с ранее полученными для этого массива результатами [Михайлова и др., 1994, табл. 23]. Возраст пород оценивается в $1720\text{—}1750$ млн лет назад. Есть все основания считать, что породы формировались в единых тектонических условиях и, учитывая определение возраста и координаты палеомагнитных полюсов, в том же временном диапазоне, что и породы Новомиргородского массива.

Новые палеомагнитные результаты дают основание рассчитать палеомагнитный полюс для обоих массивов по 6 сайтам (номера 3, 4, 5, 6, 10, 11 в табл. 1) для возраста 1750 млн лет назад, координаты полю-

са $\Phi = 22,7^\circ$ N, $\Lambda = 164,3^\circ$ E, $dp/dm = 4,9^\circ/9,6^\circ$. Мы считаем, что определенный полюс может быть принят как ключевой для Ингульского мегаблока УЩ для возраста 1750 млн лет назад.

Среднее палеомагнитное направление, полученное для даек 1 + 2 карьера Субботцы ($D = 245,6^\circ$; $I = 42,3^\circ$, $\alpha_{95} = 4,3^\circ$), близко к результатам, полученным по этим же дайкам другими авторами ($D = 232,5^\circ$; $I = 37,0^\circ$, $\alpha_{95} = 5,6^\circ$ [Лубнина и др., 2009]). Возраст этих даек оценивается $1770 \pm 9,5$ млн лет. В работе [Лубнина и др., 2009] также приведены палеомагнитные направления для вмещающих гранитоидов, а также аргументы относительно первичности высокотемпературной ChRM-компоненты намагниченности. Однако рассчитанный полюс по дайкам карьера Субботцы как нами ($\Phi = -3,6^\circ$, $\Lambda = 156,3^\circ$), так и Н.В. Лубниной и др. [2009] ($\Phi = 6,4^\circ$, $\Lambda = 164,1^\circ$) не соответствует полюсам, рассчитанным по анортозитам Новомиргородского и Городищенского массивов (см. табл. 1). Результаты дополнительных детальных работ в районе карьера Субботцы указывают на то, что породы, на которых были выполнены предыдущие палеомагнитные определения, претерпели существенные изменения. Это ставит под сомнение пригодность использования палеомагнитных направлений, полученных на карьере Субботцы, для палеотектонических реконструкций.

В табл. 2 приведены ключевые полюсы для возрастов 1770 и 1750 млн лет назад для Фенноскандии и УЩ, которые на рис. 2, б показаны соответственно голубым и зеленым цветами. В соответствии с этими данными на рис. 3 приведена модель взаимного расположения этих блоков. Около 1770 млн лет назад Фенноскандия и УЩ занимали палеошироты 15° N и 2° S соответственно. При этом УЩ был повернут относительно Фенноскандии на 40° против часовой стрелки (относительно его современного положения в составе ВЕП). За последующие 20 млн лет Фенноскандия и УЩ продрейфовали в южном направлении примерно на 5° и заня-

Т а б л и ц а 1. Палеомагнитные направления и полюсы, определенные по породам Ингульского блока УЩ (высокотемпературная ChRM-компонента намагниченности)

№	Породы	<i>N/n</i>	<i>D</i> , град	<i>I</i> , град	К	α_{95} , град	Φ° , N	Λ° , E	<i>dp, dm</i> , град
Новоукраинка ($48^\circ 22,422'N$, $31^\circ 29,580'E$). Возраст пород $2037,4 \pm 0,6$ млн лет назад									
1	Габбро-монцитониты	14/22	46,5	36,4	33	7,0	43,5	141,6	4,8/8,2
Вязовок ($49^\circ 10,565'N$, $31^\circ 22,072'E$). Возраст пород: (дайка) $1752,8 \pm 6,5$ млн лет назад анортозиты 1740—1750 млн лет назад									
3	Дайка габбро	12/29	41,5	-6,1	31	8,0	26,7	163,6	4,0/8,0
4	Вмещающие анортозиты	13/29	41,6	-16,4	35	7,1	21,9	166,3	3,8/7,3
Лекарево ($48^\circ 44,867'N$, $31^\circ 32,676'E$)									
5	Габбро- анортозиты	12/13	217,8	19,9	6	19,1	22,3	170,9	10,5/20,0
Каменка ($48^\circ 47,716'N$, $31^\circ 42,891'E$). Возраст пород 1750 млн лет назад									
6	Анортозиты	9/11	218,2	26,6	8	19,8	18,9	172,1	11,7/21,5
Карьер Субботцы ($48^\circ 38,3'N$, $32^\circ 32,1'E$). Дайки габбро-диабаз $1770 \pm 9,5$ млн лет назад									
8	Габбро-диабазы, дайка-1	24/32	242,7	38,2	31	5,4	-0,6	156,7	3,8/6,4
9	Габбро-диабазы, дайка-2	13/20	252,1	49,6	63	5,3	-11,8	155,4	4,7/7,0
Корсунь-Шевченковский ($49^\circ 24,746'N$, $31^\circ 17,558'E$). 1720—1750 млн лет назад									
10	Граниты рапакиви	16/21	54,5	0,1	4	21,8	22,2	149,7	10,9/21,8
Хлистуновка ($49^\circ 12,840'N$, $31^\circ 26,405'E$). 1725—1745; 1725 ± 12 ; 1720 ± 10 млн лет назад									
11	Габбро- лабродориты	11/34	43,8	-14,8	12	13,5	21,6	163,9	7,1/13,8

Примечание: *N/n* — общее количество измеренных образцов/количество образцов, по которым была выделена ChRM-компонента; *D*, *I* — склонение и наклонение средних направлений ChRM; К — кучность векторов; α_{95} — радиус круга доверия при вероятности $P = 0,95$ для среднего направления вектора; Φ° , Λ° — широта и долгота палеомагнитного полюса; *dp, dm* — полуоси овала погрешности для среднего полюса. Приведены координаты мест отбора образцов и геохронологические определения возраста пород.

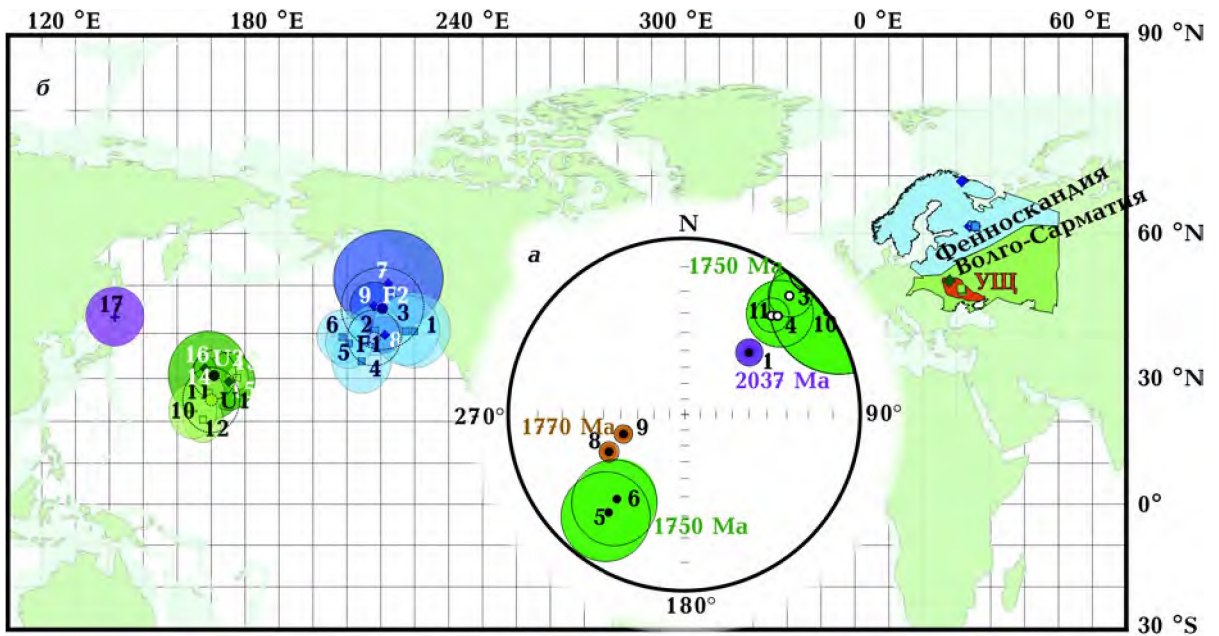


Рис. 2. Средние палеомагнитные направления ChRM-компоненты по сайтам Ингульского мегаблока. Нумерация соответствует номерам сайтов табл. 1. Возраст приведен в млн лет назад. Залитые (полюе) круги — проекции на нижнюю (верхнюю) полушферы (а); ключевые палеомагнитные полюсы для Фенноскандии (голубой цвет) и Сарматии (УЩ) (зеленый цвет). Нумерация полюсов приведена в соответствии с табл. 2. Местоположение средних полюсов для Фенноскандии и УЩ для возрастов 1770 и 1750 млн лет назад соответственно приведены обозначениями F₂, F₁ и U₂, U₁. Все результаты представлены с 95 % овалами доверия (б).

ли палеошироты 10° N и 7° S соответственно, при этом вращения блоков почти не происходило. Средняя скорость широтного дрейфа обоих блоков составляла около 2,8 см/год.

Палеомагнитный полюс, рассчитанный для габбро-монзонитов Новоукраинки возрастом 2037,4 ± 0,6 млн лет (Φ = 43,5°, Λ = 141,6°), хорошо согласуется с полюсами, полученными для Северо-Западного

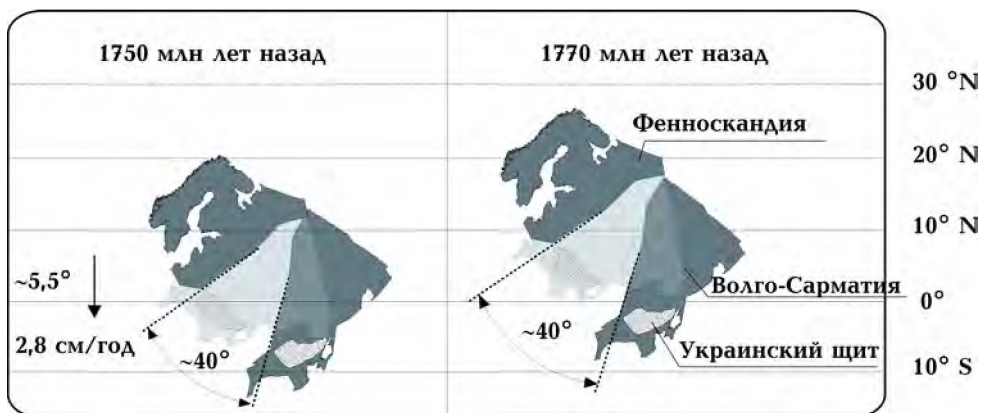


Рис. 3. Реконструкция взаимного расположения Фенноскандии и УЩ для временного интервала 1770 и 1750 млн лет назад. Светло-серым оттенком приведено положение Волго-Сарматии в современной конфигурации ВЕП (без привязки к современным широтам).

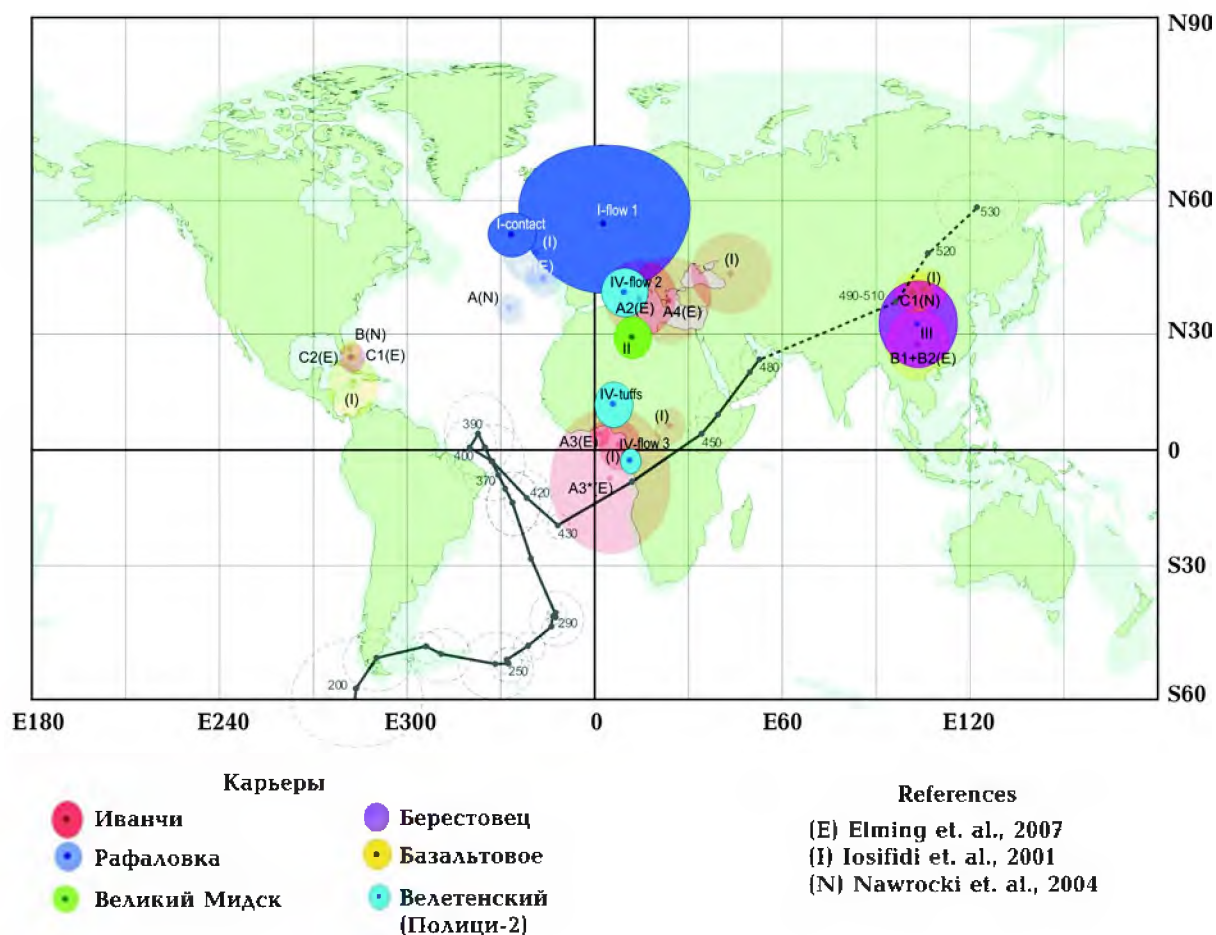


Рис. 4. Средние палеомагнитные полюсы, полученные по вендским базальтам Волыни: обозначения (E), (I), (N) присвоены полюсам, приведенным соответственно в работах [Elming et al., 2007; Iosifidi et al., 2001; Nawrocki et al., 2004]; первые буквенные обозначения соответствуют обозначениям полюсов, приведенных в этих работах. Новые палеомагнитные данные обозначены римскими цифрами. Все результаты приведены с 95 % овалами доверия, разными цветами показано, на каких карьерах были получены результаты. Толстой черной линией приведена референтная кривая APWP для Балтики/стабильной Европы по [Torsvik et al., 2012], ключевые полюсы на кривой приведены черными точками с 95 % овалами доверия, цифры указывают возраст в млн лет назад. Фрагмент для кембрия—ордовика приведен пунктиром из-за недостаточного количества палеомагнитных определений.

мегаблока [Elming et al., 2001], возраст которых оценивается около 2000 млн лет назад. Эти полюсы расположены значительно севернее группы полюсов возрастом 1770—1750 млн лет назад (см. местоположение полюса 17 на рис. 2, б).

Для палеомагнитных исследований перспективен Коростенский комплекс в северо-западной части УЩ, который включает в себя одноименный плутон и ряд мелких интрузивных тел вдоль его окраины. Породы представлены интрузивно-магма-

тическими образованиями анортозит-рапакиви-гранитной формации. Новые геохронологические оценки возраста пород, наряду с анализом более ранних результатов, указывают на диапазон формирования пород от 1815 до 1743 млн лет назад с двумя основными фазами магматизма 1800—1780 и 1770—1758 млн лет назад [Shumlyansky et al., 2017]. Палеомагнитно информативными являются анортозиты и габбро-анортозиты, о чем свидетельствуют результаты предыдущих исследо-

Т а б л и ц а 2. Выборка палеомагнитных полюсов для Фенноскандии и УЩ (Сарматии)

№	S_{lat} °N	S_{lon} °E	P_{lat} °N	P_{lon} °E	α_{95} , град	Возраст, млн лет	Q	Блок	Ссылка на источник
Фенноскандия									
1	61,2	35,6	40,5	229,8	8,1	1751	3	Ка	[Fedotova et al., 1999]
2	61,5	34,5	40,7	218,2	5,5	1751	3	—	[Fedotova et al., 1999]
3	61,5	34,5	40,5	227,3	7,5	1751	3	—	[Храмов и др., 1997]
4	61,2	35,6	36,2	208,6	5,8	1751	3	—	[Fedotova et al., 1999]
5	61,3	35,4	37,8	210,6	5,5	1751	3	—	[Damm et al., 1997]
6	61,3	35,5	33,9	214,3	7,3	1751	3	—	[Храмов и др., 1997]
F_1	61,3	35,2	38,5	217,9	6,1	~ 1750	—	—	Средний полюс, $N = 6$
7	69,1	31,5	50,4	222,2	10,2	1767	5	Ко	[Veselovskiy et al., 2013]
8	61,3	33,8	39,7	221,1	4	1770	5	Ка	[Pisarevsky, Sokolov, 2001]
9	61,3	35,4	45,8	218	4,9	1775	3	—	[Damm et al., 1997]
F_2	63,9	33,8	45,3	220,4	8,5	~ 1770	—	—	Средний полюс, $N = 3$
Украинский щит (Сарматия)									
10	49,1	31,5	22,4	164,5	6,51	1750	5	Ин	[Кировоградский ..., 2013]
11	50,4	28,9	26,7	169,2	4,2	1755	6	СзУЩ	[Elming et al., 2010]
12	50,6	28,6	20,5	167,5	5,5	1740	6	—	[Elming et al., 2010]
13	50,6	28,8	30,2	177,6	2,8	1755	5	—	[Kravchenko, 2005]
U_1	50,2	29,5	25,0	169,6	7,6	~ 1750	—	—	Средний полюс, $N = 4$
14	50,5	28,5	30,4	169,1	10,1	1770	2	СзУЩ	[Elming et al., 2001]
15	50,7	28,7	29,3	175,2	6,6	1770	2	—	[Elming et al., 2001]
16	51,0	28,5	32,3	168,1	2,7	1770	3	—	[Elming et al., 2001]
U_2	50,7	28,6	30,7	170,8	5,6	~ 1770	—	—	Средний полюс, $N = 3$
17	48,4	31,5	43,5	141,6	6,2	2037	—	Ин	[Кировоградский ..., 2013]

Примечание: № — индексы полюсов в соответствии рис. 2, б, (средние палеополюсы выделены жирным); S_{lat} , S_{lon} — широта и долгота места отбора; P_{lat} , P_{lon} — широта и долгота палеомагнитного полюса; α_{95} — круг доверия, где с 95 % вероятности находится среднее направление полюса; блоки: Ка — Карельский, Ко — Кольский, Ин — Ингульский, СзУЩ — Северо-Западный; Q — критерий надежности палеомагнитных данных, по [Van der Voo, 1990], N — количество усредненных палеополюсов.

ваний, а также наши новые данные, полученные на более чем 15 объектах. Палеомагнитные исследования образцов из этих объектов продолжаются.

Палеомагнетизм венда территории Украины. Из всех геологических систем венд занимает особое место. В докембрии только венд является системой фанерозойского типа, и на его разрезах изучаются закономерности формирования структур чехла докембрийских платформ, планетарных стратиграфических корреляций верхнедокембрийских образований, а также начальные этапы эволюции земных биот.

Относительно палеомагнитной изученности венда здесь сложилась спорная ситуация. Для древних платформ получены группы почти одновозрастных, но различных по направлению полюсов, что приводит к неоднозначности в интерпретации имеющихся палеомагнитных данных и является предметом острых дискуссий [Torgvik et al., 1998; Meert et al., 1999; Abrajevich, Van der Voo, 2010 и др.]. Как следствие, были выдвинуты разные гипотезы, касающиеся эволюции литосферы нашей планеты на рубеже докембрия и фанерозоя. В частности, Д. Киршвинком с соавторами [Kirschvink et al., 1997] была предложена гипотеза ПТРВ, согласно которой в результате перераспределения масс в литосфере и мантии, в верхнем венде—нижнем кембрии произошла смена осей инерции Земли. Это было причиной быстрого (на протяжении 15—20 млн лет) смещения литосферы и мантии относительно оси вращения Земли ("истинного" смещения полюса) на величину порядка 90°. Такое "опрокидывание" полюса могло быть спусковым механизмом для глобальной в масштабах планеты тектонической, палеогеографической, климатической и биосферной перестройки, произошедшей в начале кембрийского периода. Авторы работы [Abrajevitch, Van der Voo, 2010], проанализировав имеющиеся данные по эдикарию Лаврентии и Балтики, пришли к выводу о крайне нерегулярном, аномальном поведении геомагнитного поля. Было выдвинуто предположение, что геометрия

поля была обусловлена чередованием коаксиального и экваториального диполей (как следствие некоторых специфических условий в ядре и/или на границе ядро—мантия). В работе [Halls et al., 2015] приведены данные о большом количестве быстрых инверсий магнитного поля около 585 млн лет назад и высказано предположение, что длительный период частых магнитных инверсий мог сыграть определенную роль в эволюции фауны. В дискуссии [Pisarevsky et al., 2001] авторы указывают на то, что доступная палеомагнитная информация не позволяет однозначно решить проблему высокоширотного либо низкоширотного положения Лаврентии в венде. В недавней работе [Levashova et al., 2015] проанализированы палеомагнитные данные по Балтике и Лаврентии возрастом от 615 до 530 млн лет и сделан вывод, что до сих пор нет неоспоримого сценария для открытия океана Япетус, который был бы основан на непротиворечивых геологических и палеомагнитных данных. Можно привести ряд других работ, но они не решают проблему неопределенности в положении венд-раннекембрийских полюсов, что обусловлено крайней противоречивостью существующих палеомагнитных данных. Попытки селекции имеющихся определений по их надежности и качеству не дают определенного результата, что ставит под сомнение саму возможность их использования для решения тектонических задач. Таким образом, получение надежных палеомагнитных данных для венда и раннего кембрия является актуальной проблемой современной палеомагнитологии.

В этой связи разрез нижнего и верхнего венда Украины — один из лучших гипостратотипов вендской системы. Вендские отложения широко распространены на западном склоне УЦ и подразделяются на три серии — Волинскую (нижний венд), Могилев-Подольскую и Каниловскую (верхний венд) [Стратиграфія ..., 2013], которые представлены как вулканогенными, так и осадочными породами.

Отложения нижнего венда представле-

ны трапповой формацией платформенного чехла, породы представлены как эффузивной, так и пирокластической субвулканической фациями. Территориально траппы образуют два разных по площади не связанных между собой вулканических поля. Главное, Беловежско-Подольское, охватывает довольно большую площадь, но выходы базальтов на земную поверхность наблюдаются только в отдельных местах и вскрываются карьерами в Ровенской области вблизи населенных пунктов Берестовец, Базальтовое, Великий Мидск, Иванчи, Рафаловка. В этих карьерах образцы для палеомагнитных исследований отбирались неоднократно разными коллективами [Iosifidi et al., 2001, Глевасская и др., 2000, 2006; Nawrocki et al., 2004; Elming et al., 2007]. Во всех работах отмечалась палеомагнитная информативность исследуемых пород, на основании которой выполнялись разные палеотектонические реконструкции.

Недавно выполненные нами палеомагнитные исследования образцов из этих же карьеров позволили выделить ChRM-компоненту намагниченности, которая для низкотитанистых базальтов ратненской свиты по всем признакам является первичной. Об этом свидетельствуют положительный тест контакта, биполярность направлений ChRM-компоненты разных базальтовых потоков, а также хорошее согласование палеомагнитных данных с результатами предыдущих исследований (рис. 4). Тем не менее очевиден разброс направлений полюсов, который нельзя объяснить перемагничиванием пород, ненадежным выделением направлений первичной намагниченности, недостаточным усреднением вековой вариации и пр.

Поскольку для траппов Волыни: а) стратиграфическое положение базальтовых потоков ратненской свиты надежно установлено в соответствии с общепринятыми схемами стратификации венда для ВЕП; б) на них разными методами получены непротиворечивые геохронологические определения возраста в диапазоне 590—550 млн лет назад; в) уверенно выделяется ChRM-

компонента термоостаточной намагниченности, которая по всем признакам первична — на образцах-дублях низкотитанистых базальтов были успешно проведены определения палеонапряженности. Результаты показали чрезвычайно низкие значения палеонапряженности (1,5—8,8) мкТл, на порядок и более ниже соответствующих значений для современного геомагнитного поля [Shcherbakova et al., 2018]. С одной стороны, это может свидетельствовать об аномальном поведении геомагнитного поля в венде и, возможно, его недипольности — поле было необычно слабым и многополярным. С другой стороны, нельзя исключить, что мы исследовали зону инверсии магнитного поля. И тем, и другим можно объяснить разброс направлений палеополюсов, который наблюдается для разных базальтовых потоков, однако имеет свои закономерности. Если сравнить средние палеомагнитные полюсы базальтовых потоков и прослоев туфа, очевидно закономерное смещение их широт от более высоких к более низким.

На данном этапе мы не можем принять ни один из выводов. Палеомагнитные исследования траппов Волыни продолжают, и одной из задач является изучение эволюции магнитного поля Земли в венде. Полученными за последнее десятилетие результаты свидетельствуют о том, что в истории Земли существовали достаточно длительные (порядка нескольких миллионов лет и более) интервалы, в течение которых состояние геомагнитного поля не соответствовало ни нормальному инверсионному, ни суперхронному режимам, рис. 1, а [Павлов и др., 2004; Abrajevitch, Van der Voo, 2010; Biggin et al., 2012; Bazhenov et al., 2016; Halls, 2015 и др.]. Главная особенность такого состояния — крайняя вариабельность основных параметров поля (направления, напряженности, амплитуды вековых вариаций и т. п., так называемый “гиперактивный” режим со сверхвысокой частотой инверсий до 10 и более на миллион лет) и/или существенное отклонение поля от аксиальной дипольной модели. Предполагается, что низкая вели-

чина поля может указывать на то, что поле было мультиполюсным, а не дипольным, т. е. поднимается вопрос о времени формирования твердого ядра нашей планеты.

Для тестирования этих гипотез на территории Украины есть другие перспективные объекты, в частности вендские—кембрийские осадочные толщи Подолии, достигающие мощности сотни метров в естественных обнажениях. Возраст этих отложений надежно обоснован палеонтологическими данными, т. е. они имеют четкую стратиграфическую привязку, а также представляют один из наиболее полных седиментационных циклов морского осадконакопления на территории ВЕП в вендское время [Великанов и др., 1983, 1990].

Породы представлены широким фациальным спектром, от гравелитов и конгломератов до мелкозернистых песчаников и алевроаргиллитов. При этом окраска пород варьируется от белой до темно бурой и служит одним из признаков при выборе объектов для исследований. Опираясь на опыт работ на силурийских и нижнедевонских отложениях Подолии [Бахмутов и др., 2012; Jeleńska et al., 2014], наиболее палеомагнитно информативными являются красноцветные формации. Что касается вендских отложений, то подобная тенденция сохраняется. Красноцветные отложения имеют величины ЕОН на один-два порядка выше сероцветов, характеризуются высокими деблокирующими температурами, при которых выделяется ChRM, в качестве носителей первичной намагниченности идентифицируются зерна детритового гематита (с незначительной примесью титана), природа намагниченности — ориентационная. Другими словами, при выборе объектов приоритетным остается исследование именно красноцветной формации венда.

На территории Подолии ранее предпринимались попытки палеомагнитного изучения вендских отложений. Результаты последних работ, выполненных на современной высокочувствительной аппаратуре, приведены в работе [Iosifidi et al.,

2005]. Была охвачена значительная по мощности толща венда, но полученные результаты оказались довольно неоднозначными. Было получено несколько палеомагнитных определений, которые были проинтерпретированы как направления, характерные для более поздних геологических эпох. Такая мультикомпонентная система ЕОН авторами объяснялась как проявление вторичных процессов перемагничивания, результаты не укладывались ни в одну вендскую (неопротерозойскую) палеотектоническую модель [Iosifidi et al., 2005].

Исходя из вышеизложенного, приоритетной задачей считаем определение палеомагнитно информативных толщ вендских отложений Подолии. Для этого необходимо выполнение комплексного анализа палеомагнитных результатов с привлечением надежных геолого-геохимических данных и материалов высокоразрешающей электронной микроскопии. Это позволит диагностировать минералы железа, с которыми связаны компоненты намагниченности. Если будут получены соответствующие друг другу палеомагнитные направления ChRM-компонент намагниченности для разновозрастных вулканогенных (базальтов) и осадочных пород, это будет весомым аргументом в пользу выделения первичной намагниченности. На основе этого можно будет получить новую информацию о структуре и эволюции поля в венде, а также оценить возможность применения палеомагнитных данных для проведения палеотектонических (палеогеографических) реконструкций.

Заключение. Уже более полувека ученые получают информацию о древнем магнитном поле Земли, которая широко используется как для создания геомагнитной временной шкалы (магнитостратиграфия и магнитохронология), так и для тестирования гипотезы тектоники плит и реконструкции древних суперконтинентов. Палеомагнитные полюсы, определенные для разных временных интервалов, являются основой для построения ТКМП отдельных тектонических блоков, что позволяет получить численные оценки их движе-

ния для разных периодов геологической истории.

Малое количество докембрийских объектов, "пригодных" для проведения палеомагнитных исследований, и недостаточное количество надежных определений возраста пород современными изотопно-геохронологическими методами определяют чрезвычайную актуальность как проблемы построения ТКМП, так и определения хотя бы надежных единичных палеополюсов в докембрии (для любого кратона).

Для пород УЩ благодаря результатам предыдущих многолетних исследований как палеомагнитно информативные были выделены породы габбро-анортозитовой формации. Казалось бы, в настоящее время благодаря появлению многочисленных новых определений абсолютного возраста пород УЩ появились новые возможности для разработки современной модели ТКМП для УЩ. К сожалению, проведенные нами исследования пилотных коллекций образцов из некоторых опорных обнажений в Среднеприднепровском, Приазовском, Днестровско-Бугском, Ингульском и Северо-Западном блоках УЩ, которые имели современные надежные геохронологические определения, показали их палеомагнитную неинформативность.

Информативными в палеомагнитном отношении были выделены породы анортозит-рапакиви-гранитной формации Ингульского мегаблока в центральной части УЩ (в пределах Корсунь-Новомиргородского плутона и Новоукраинского массива). По результатам были рассчитаны координаты палеомагнитного полюса ($\Phi = 22,7^\circ \text{ N}$, $\Lambda = 164,3^\circ \text{ E}$, $dp/dm = 4,9^\circ/9,6^\circ$), который, как мы считаем, может быть принят как ключевой для Ингульского мегаблока УЩ для возраста 1750 млн лет назад.

На основе анализа палеомагнитных полюсов для Фенноскандии и УЩ приведена модель взаимного расположения этих блоков для 1770 и 1750 млн лет назад. Около 1770 млн лет назад Фенноскандия и УЩ занимали палеошироты 15° N и 2° S соответственно. При этом УЩ был повернут относительно Фенноскандии на 40° про-

тив часовой стрелки относительно его современного положения в составе ВЕП. За последующие 20 млн лет Фенноскандия и УЩ продрейфовали в южном направлении примерно на 5° и заняли палеошироты 10° N и 7° S соответственно, при этом вращения блоков почти не происходило. Средняя скорость широтного дрейфа для обоих блоков составляла около 2,8 см/год.

Из других перспективных для палеомагнитных исследований пород можно выделить Коростенский комплекс северо-западного блока УЩ. По количеству палеомагнитно информативных объектов и числу современных определений возраста образование интрузивно-магматических этого комплекса занимают лидирующее положение среди пород УЩ. На данный момент исследованы и получены предварительные результаты на более чем 15 объектах, работы продолжаются.

Интерпретация палеомагнитных результатов в большой мере зависит от геохронологической привязки. Учитывая, что формирование пород Корсунь-Новомиргородского и Коростенского комплексов происходило на довольно ограниченном временном отрезке (1820—1730 млн лет), мы ставим перед собой задачу найти более древние палеомагнитно информативные породы в пределах УЩ. Как перспективные в пределах Ингульского мегаблока можно выделить более древние породы (габбромонциты) возрастом около 2000 млн лет, но пока число таких объектов ограничено. Относительно гранитов рапакиви — среди них встречаются образцы, которые являются информативными, но их число невелико и работы с такими объектами требуют больших временных (и других) затрат.

Относительно палеомагнитных исследований венда — без преувеличения можно сказать, что на территории Украины есть уникальные объекты, представленные как вулканогенными, так и осадочными породами. Однако здесь нужно быть осторожным с точки зрения применимости палеомагнитных результатов для проведения палеотектонических реконструкций. Необходимо исследовать состояние

геомагнитного поля в контексте его соответствия полю ЦОД. Для тестирования этой гипотезы есть следующие предпосылки. Во-первых, это — определение вариабельности палеомагнитных направлений, палеонапряженности и, по возможности, амплитуды вековых вариаций. Палеомагнитная информативность вендских базальтов позволяет надеяться на получение новых результатов, тем более, что в нашем распоряжении есть коллекция образцов из скважин, вскрывающих полный разрез траптовой формации Волынской серии венда. Во-вторых, это магнитостратиграфическое изучение отложений венда — кембрия Подолии с целью получения фактического материала по частоте инверсий.

Следует отметить, что резерв “легких” для палеомагнитных исследований объектов, к которым применим традиционный подход, истощается, становится актуальным поиск новых подходов и выход на новые объекты. По мере получения новых материалов актуальным также будет проведение “ревизии” данных по ряду объектов, где результаты по какой-либо причине сегодня вызывают сомнения. В целом следует констатировать, что состояние палеомагнитной изученности территории Украины в последние два десятилетия заметно улучшилось, что открывает перспективы получения новых знаний об эволюции магнитного поля в докембрийской истории нашей планеты.

Список литературы

- Артеменко Г.В., Жуков Г.В., Кльоц В.А. Изотопний вік гранодіоритів району с. Осипенко (Західне Приазов'я). *Доп. АН УРСР*. 1985. Т. 3. С. 6—7.
- Бахмутов В.Г., Иосифиди А.Г. Палеомагнетизм палеопротерозойских магматических пород УЩ: *Тез. докл. Международ. науч.-практ. конф. “Стратиграфия, геохронология и корреляция нижнедокембрийских породных комплексов фундамента Восточно-Европейской платформы” (31 мая—4 июня 2010 г.)*. Киев: УкрГГРИ, 2010. С. 25—27.
- Бахмутов В., Тейсер-Еленская М., Кадзялко-Хофмоэль М., Поляченко Е., Константиненко Л. Палеомагнитные исследования нижнедевонских сероцветных отложений Подолии. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 6. С. 57—67. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116703>.
- Великанов В.А., Асеева Е.А., Федонкин М.А. Венд Украины. Киев: Наук. думка, 1983. 162 с.
- Великанов В.А., Коренчук Л.В., Кириянов В.В., Гуреев Ю.А., Асеева Е.А. Венд Подолии. Путеводитель экскурсии III Международного симпозиума по кембрийской системе и границе венда и кембрия. Киев, 1990. 129 с.
- Галле И., Павлов В.Э. Три режима работы геодинамо. *Физика Земли*. 2016. № 2. С. 148—153. doi: 10.7868/S0002333716020046.
- Глевасская А.М., Кравченко С.Н., Косовский Я.А. Магнитостратиграфия траптовой формации юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 121—130.
- Глевасская А.М., Михайлова Н.П., Кравченко С.Н. Палеомагнетизм волынской и могилев-подольской серий венда юго-западной части Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 2. С. 3—18.
- Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых. Ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтов. Киев: Прасты луды, 2013. 500 с.
- Лубнина Н.В., Богданова С.В., Шумлянский Л.В. Восточно-Европейский кратон в палеопротерозое: новые палеомагнитные определения по магматическим комплексам Украинского щита. *Геофизика*. 2009. № 5. С. 56—64.

- Михайлова Н.П. Проблемы палеомагнетизма докембрия. Киев: Наук. думка, 1982. 204 с.
- Михайлова Н.П., Глевасская А.М. Намагниченность основных и ультраосновных пород Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1989. 196 с.
- Михайлова Н.П., Кравченко С.Н., Глевасская А.М. Палеомагнетизм анортозитов. Киев: Наук. думка, 1994. 212 с.
- Павлов В.Э., Галле И., Шаццлло А.В., Водозовов В.Ю. Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лена — новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя. *Физика Земли*. 2004. № 2. С. 28—49.
- Палеомагнитология. Ред. А.Н. Храмов. Ленинград: Недра, 1982. 312 с.
- Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан. Москва: Изд. ИФЗРАН, 1995. 298 с.
- Степанюк Л.М. Кристаллогенезис и возраст циркона из пород мафит-ультрамафитовой ассоциации Среднего Побужья. *Минерал. журн.* 1996. Т. 18. № 4. С. 10—19.
- Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України: у 2 т. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України. Голов. ред. П.Ф. Гожик. Київ: Логос, 2013. 638 с.
- Храмов А.Н., Федотова М.А., Писакин Б.Н., Прияткин А.А. Палеомагнетизм раннепротерозойских интрузий и связанных с ними пород Карелии и Кольского полуострова: вклад в разработку модели докембрийской эволюции Русско-Балтийского кратона. *Физика Земли*. 1997. № 6. С. 24—41.
- Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н. Геохронология раннего докембрия УЩ. Архей. Киев: Наук. думка, 2005. 242 с.
- Abrajevitch, A. & Van der Voo, R. (2010). Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(1-2), 164—170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.038>.
- Bazhenov, M. L., Levashova, N. M., Meert, J. G., Golovanova, I. V., Danukalov, K. N. & Fedorova, N. M. (2016). Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 124—135. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.015>.
- Besse, J. & Courtillot, V. (2002). Apparent and True Polar Wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *Journal of Geophysical Research*, 107. <http://doi.org/10.1029/2000JB000050>.
- Biggin, A.J., Steinberger, B., Aubert, J., Suttie, N., Holme, R., Torsvik, T. H., van der Meer, D. G. & van Hinsbergen, D.J.J. (2012). Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. *Nature Geoscience*, 5(8), 526—533. <https://doi.org/10.1038/ngeo1521>.
- Creer, K. M., Irving, E. & Runcorn, S. K. (1954). The direction of the geomagnetic field in remote epochs in Great Britain. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 6(4) 163—168. <https://doi.org/10.5636/jgg.6.163>.
- Damm, V., Gendler, T.S., Gooskova, E. G., Khramov, A. N., Lewandowski, M., Nozharov, P., ... Sokolov, S.J. (1997). Palaeomagnetic studies of Proterozoic rocks from the Lake Onega region, southeast Fennoscandian Shield. *Geophysical Journal International*, 129(3), 518—530. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04491.x>.
- Elming, S. A., Kravchenko, S. N., Layer, P., Rusakov, O. M., Glevasskaya, A. M., Mikhailova, N. P., & Bachtadse, V. (2007). Palaeomagnetism and ⁴⁰Ar/³⁹Ar age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up. *Journal of the Geological Society*, 164(5), 969—982. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-163>.
- Elming, S.-A., Mikhailova, N. P. & Kravchenko, S. N. (2001). Palaeomagnetism of Proterozoic rocks from the Ukrainian Shield: new tectonic reconstruction of the Ukrainian and

- Fennoscandian shields. *Tectonophysics*, 339(1-2), 19—38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00032-4).
- Elming, S.-A., Mikhailova, N.P. & Kravchenko, S.N. (1998). The Consolidation of the East European Craton: a paleomagnetic analysis of Proterozoic rocks from the Ukrainian Shield and tectonic reconstructions versus Fennoscandia. *Geophysical Journal*, 20(4), 71—74.
- Elming, S.-A., Pesonen, L.J., Leino, M., Khramov, A.N., Mikhailova, N.P., Krasnova, A.F., ... Terho, M. (1993). The continental drift of the Fennoscandian and Ukrainian Shields during the Precambrian. *Tectonophysics*, 223(3-4), 177—198. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90137-9](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(93)90137-9).
- Elming, S.-A., Shumlyansky, L., Kravchenko, S., Layer, P. & Söderlund, U. (2010). Proterozoic Basic dykes in the Ukrainian Shield: A palaeomagnetic, geochronologic and geochemical study — The accretion of the Ukrainian Shield to Fennoscandia. *Precambrian Research*, 178(1), 119—135. <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.001>.
- Fedotova, M.A., Khramov, A.N., Pisakin, B.N. & Priyatkin, A.A. (1999). Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield. *Geophysical Journal International*, 137(3), 691—712. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00817.x>.
- Gallet, Y., Pavlov, V., Halverson, G., & Hulot, G. (2012). Toward constraining the long-term reversing behavior of the geodynamo: A new “Maya” superchron ~1 billion years ago from the magnetostratigraphy of the Kartochka Formation (southwestern Siberia). *Earth and Planetary Science Letters*, 229-340, 117—126. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.049>.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. & Ogg, G.M. (Eds). (2012). *The Geologic Time Scale 2012* (Vol. 1). Boston: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.01001-5>.
- Halls, H.C., Lovette, A., Hamilton, M. & Söderlund, U. (2015). A paleomagnetic and U-Pb geochronology study of the western end of the Grenville dyke swarm: Rapid changes in paleomagnetic field direction at ca. 585 Ma related to polarity reversals? *Precambrian Research*, 257, 137—166. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.029>.
- Iosifidi, A.G., Bachtadse, V., Taiat, J., Khramov, A.N. & Kuznetsova, A.V. (2001). Palaeomagnetic data from Vendian rocks from the Ukraine. XXVI EGS General Assembly, Nice 2000. *Geophysical Research Abstracts*, (3), 1206.
- Iosifidi, A.G., Khramov, A.N. & Bachtadse, V. (2005). Multicomponent magnetization of Vendian sedimentary rocks in Podolia, Ukraine. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7(1), 1—14.
- Jarboe, N.A., Koppers, A.A., Tauxe, L., Minnett, R. & Constable, C. (2012). *The online MagIC Database: data archiving, compilation, and visualization for the geomagnetic, paleomagnetic and rock magnetic communities*. Abstract GP31A-1063, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco.
- Jeleńska, M., Kądziałko-Hofmokl, M., Bakhmutov, V., Poliachenko, I. & Ziółkowski, P. (2014). Palaeomagnetic and rock magnetic study of Lower Devonian sediments from Podolia, SW Ukraine: remagnetization problems. *Geophysical Journal International*, 200(1), 557—573. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu411>.
- Kirschvink, J.L., Ripperdan, R.L., Evans D.A. (1997). Evidence for a Large-Scale Reorganization of Early Cambrian Continental Masses by Inertial Interchange True Polar Wander. *Science*, 277, 541—545. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.541>.
- Kravchenko, S.N. (2005). First estimate for the age of a mesoproterozoic palaeomagnetic pole from the Volodarsk-Volynsky Massif, The Ukrainian Shield. *Studia Geophysica et Geodae-tica*, 49(2), 177—190. <https://doi.org/10.1007/s11200-005-0004-6>.
- Levashova, N.M., Bazhenov, M.L., Meert, J.G., Danukalov, K.N., Golovanova, I.V., Kuznetsov, N.B. & Fedorova, N.M. (2015). Paleomagnetism of upper Ediacaran clastics from the South Urals: Implications to paleogeogra-

- phy of Baltica and the opening of the Iapetus Ocean. *Gondwana Research*, 28(1), 191—208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.04.012>.
- Meert, J. G. (1999). A paleomagnetic analysis of Cambrian true polar wander. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1-2), 131—144. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00042-4).
- Nawrocki, J., Boguckij, A. & Katinas, V. (2004). New late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ. *Geological Quarterly*, 48(4), 309—316.
- Pisarevsky, S.A., Komissarova, R.A. & Khramov, A.N. (2001). Reply to comment by J. G. Meert and R. Van der Voo on "New palaeomagnetic result from Vendian red sediments in Cisbaikalia and the problem of the relationship of Siberia and Laurentia in the Vendian". *Geophysical Journal International*, 146(3), 871—873. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01475.x>.
- Pisarevsky, S.A. & McElhinny, M.W. (2003). Global Paleomagnetic Data Base developed into its visual form. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 84(20), 192—192. <https://doi.org/10.1029/2003EO200007>.
- Pisarevsky, S.A. & Sokolov, S.J. (2001). The magnetostratigraphy and a 1780 Ma palaeomagnetic pole from the red sandstones of the Vazhinka River section, Karelia, Russia. *Geophysical Journal International*, 146(2), 531—538. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01479.x>.
- Shcherbakova, V., Bakhmutov, V., Shcherbakov, V. & Zhidkov, G. (2018). Extremely low palaeointensities in the Neoproterozoic obtained on volcanic rocks from the Ukrainian Shield. EGU General Assembly 2018. *Geophysical Research Abstracts*, 20.
- Shumlyansky, L., Hawkesworth, C., Billström, K., Bogdanova, S., Mytrokhyn, O., Romer, R., ... Bilan, O. (2017). The origin of the Palaeoproterozoic AMCG complexes in the Ukrainian Shield: New U-Pb ages and Hf isotopes in zircon. *Precambrian Research*, 292, 216—239. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.02.009>.
- Torsvik, T.H., Meert J.G. & Smethurst M.A. (1998). Polar Wander and the Cambrian. *Science*, 279, 9. <https://doi.org/10.1126/science.279.5347.9a>.
- Torsvik, T.H., Müller, R.D., Van der Voo, R., Steinberger, B. & Gaina, C. (2008). Global plate motion frames: Toward a unified model. *Reviews of Geophysics*, 46(3). <http://dx.doi.org/10.1029/2007RG000227>.
- Torsvik, T., Van Der Voo, R., Preeden, U., Mac Niocaill, C., Steinberger, B., Doubrovine, P.V., ... Cocks, L.R. M. (2012). Phanerozoic polar wander, paleogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*, 114(3-4), 325—368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
- Van der Voo, R. (1993). *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans*. London: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524936>.
- Van der Voo, R. (1990). The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 184(1), 1—9. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90116-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90116-P).
- Veikkolainen, T., Pesonen, L. J. & Evans, D.A.D. (2014). PALEOMAGIA: A PHP/MYSQL database of the Precambrian paleomagnetic data. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 58(3), 425—441. <https://doi.org/10.1007/s11200-013-0382-0>.
- Veselovskiy, R.V. (2013) Paleomagnetism, geochronology and magnetic mineralogy of Devonian dikes from the Kola alkaline province (NE Fennoscandian Shield). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(4), 526—547. <https://doi.org/10.1134/S106935131303018X>.

Problems of Precambrian paleomagnetism in the territory of Ukraine

V.G. Bakmutov, I.B. Poliachenko, S.I. Cherkes, 2018

Some problems of paleomagnetic research of the Precambrian rocks of Ukraine are considered. The results of paleomagnetic researches of the Proterozoic rocks of the Ukrainian Shield, Ediacaran traps of Volyn and sedimentary rocks of Podolia were analyzed. With the emergence of many new isotopic age data for the Ukrainian Shield rocks we have new opportunities to get reliable palaeomagnetic poles. But our studies of the pilot collections of samples from some key outcrops in the Middle Dnieper, Azov, Dniester-Bug, Ingul and North-Western crustal blocks of the Ukrainian Shield with modern geochronological isotopic ages showed their absence of informativity for palaeomagnetic determinations. On the Ukrainian Shield the gabbro-anorthosite and granite rapakivi of Korosten and Korsun-Novomyrhorod anorthosite-mangerite-charnockite-granite complexes in the northwestern and central part of the shield are good candidates for palaeomagnetic investigations. New paleomagnetic pole ($\Phi = 22.7^\circ \text{N}$, $\Lambda = 164.3^\circ \text{E}$, $dp/dm = 4.9^\circ/9.6^\circ$) for ages of 1750 Ma were calculated for six sites within Ingul megablock. Based on the analysis of paleomagnetic poles for Fennoscandia and the Ukrainian Shield the model of relative position and orientation of these blocks at 1770 and 1750 Ma were calculated. About 1770 Ma Fennoscandia and the Ukrainian Shield occupied low latitudinal positions (15°N and 2°S respectively). At the same time the Ukrainian Shield was rotated anticlockwise about 40° relatively to Fennoscandia. In the next 20 Ma Fennoscandia and the Ukrainian shield drifted southward at about 5° and occupied 10°N and 7°S paleolatitudes respectively, but relative rotation of blocks almost did not occur. The average speed of latitudinal drift of both blocks was near to 2.8 cm/yr. The new results of paleomagnetic studies of Volyn basalts of Ratne suite are presented. We assume that the geometry of the geomagnetic field was not dipole as one of the interpretation of these results. In this context we should study of whole Volyn traps sequence from boreholes and Ediacaran—Cambrian sequences of Podolia in order to gather some data about frequency of geomagnetic reversals.

Key words: paleomagnetism, Ukrainian Shield, Ingul megablock, Volyn trap, Vendian Podolia.

References

- Artemenko, G.V., Zhukov, G.V., Klots, V.A. (1985). Isotopic age of granodiorites of the Osipenko village area (Western Azov). *Dopovid AN URSR*, 3, 6—7 (in Ukrainian).
- Bakmutov, V.G. & Iosifidi, A.G. (2010). Paleomagnetism of Paleoproterozoic igneous rocks of Ukrainian Shield: *The abstracts of the International Scientific-practical conference "Stratigraphy, geochronology and correlation of the Lower Precambrian rock complexes of the basement of the East European Platform" (May 31—June 4, 2010)* (pp. 25—27). Kiev: UkrGGRI (in Russian).
- Bakmutov, V., Teisseyre-Jeleńska, M., Kądziałko-Hofmokl, M., Konstantinenko, L. & Poliachenko, I. (2012). Paleomagnetic studies of Low Devonian grey deposits of Podolia. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(6), 57—67. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116703> (in Russian).
- Velikanov, V.A., Aseeva, E.A. & Fedonkin, M.A. (1983). *Vendian of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Velikanov, V.A., Korenchuk, L.V., Kiryanov, V.V., Gureev, Yu.A. & Aseeva, E.A. (1990). *Vendian of Podolia. Guide tour of the III International Symposium on the Cambrian system and the margin of the Vendian and Cambrian*. Kiev (in Russian).

- Galle, I. & Pavlov, V. E. (2016). Three modes of geodynamo. *Fizika Zemli*, (2), 148—153. doi: 10.7868/S0002333716020046 (in Russian).
- Glevasskaya, A. M., Kravchenko, S. N. & Kosovskiy, Ya. A. (2006). Magnetostratigraphic of traps from southwestern margin of the East European Craton. *Geofizicheskiy zhurnal*, 28 (4), 121—130 (in Russian).
- Glevasskaya, A. M., Mikhaylova, N. P. & Kravchenko, S. N. (2000). Paleomagnetism of the Volhynian and Mogilev-podolian series of the Vendian of southwestern part of East-European platform. *Geofizicheskiy zhurnal*, 22 (2), 3—18 (in Russian).
- Starostenko, V. I. & Gintov, O. B. (Eds). (2013). *Kirovograd ore area. Deep structure. Tectonophysical analysis. Ore deposits*. Kiev: Prastyi ludy (in Russian).
- Lubnina, N. V., Bogdanova, S. V. & Shumlyanskiy, L. V. (2009). East-European craton in the Paleoproterozoic: new paleomagnetic determinations for magmatic complexes of the Ukrainian Shield. *Geofizika*, (5), 56—64 (in Russian).
- Mikhailova, N. P. (1982). *Problems of Precambrian paleomagnetism*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Mikhailova, N. P. & Glevasskaya, A. M. (1989). *Magnetization of the basic and ultrabasic rocks of the Ukrainian Shield*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Mikhailova, N. P., Kravchenko, S. N. & Glevasskaya, A. M. (1994). *Paleomagnetism of anorthosites*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Pavlov V. E, Galle I., Shatsillo A. V. & Vodovozov V. Yu. (2004). Paleomagnetism of the Lower Cambrian in the valley of the lower reaches of the Lena River — new restrictions on the apparent polar wander of the pole of the Siberian platform and the anomalous mode of the geomagnetic field at the beginning of the Phanerozoic. *Fizika Zemli*, (2), 28—49 (in Russian).
- Khramov, A. N. (Eds). (1982). *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra (in Russian).
- Pecherskiy, D. M. & Didenko, A. N. (1995). *Paleoasian Ocean*. Moskva: IFZРАН (in Russian).
- Stepaniuk, L. M. (1996). Crystallogenesi and the age of zircon from the rocks of the mafic-ultramafic association of Middle Pobuzhye. *Mineralogicheskiy zhurnal*, 18 (4), 10—19 (in Russian).
- Hozhyk, P. F. (Eds). (2013). *Stratigraphy of Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine. Stratigraphy Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine* (Vol. 1). Kyiv: Lohos (in Ukrainian).
- Khramov, A. N., Fedotova, M. A., Pisakin, B. N. & Priiatkin, A. A. (1997). Paleomagnetism of Early Proterozoic intrusions and related rocks of Karelia and the Kola Peninsula: contribution to the development of the model of Precambrian Evolution of the Russian-Baltic Craton. *Fizika Zemli*, (6), 24—41 (in Russian).
- Shcherbak, N. P., Artemenko, G. V., Lesnaia, I. M. & Ponomarenko, A. N. (2005). *Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield*. *Archean*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Abrajevitch, A. & Van der Voo, R. (2010). Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(1-2), 164—170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.038>.
- Bazhenov, M. L., Levashova, N. M., Meert, J. G., Golovanova, I. V., Danukalov, K. N. & Fedorova, N. M. (2016). Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 124—135. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.015>.
- Besse, J. & Courtillot, V. (2002). Apparent and True Polar Wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *Journal of Geophysical Research*, 107. <http://doi.org/10.1029/2000JB000050>.
- Biggin, A. J., Steinberger, B., Aubert, J., Suttie, N.,

- Holme, R., Torsvik, T. H., van der Meer, D. G. & van Hinsbergen, D. J. J. (2012). Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. *Nature Geoscience*, 5(8), 526—533. <https://doi.org/10.1038/ngeo1521>.
- Creer, K. M., Irving, E. & Runcorn, S. K. (1954). The direction of the geomagnetic field in remote epochs in Great Britain. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 6(4) 163—168. <https://doi.org/10.5636/jgg.6.163>.
- Damm, V., Gendler, T. S., Gooskova, E. G., Khramov, A. N., Lewandowski, M., Nozharov, P., ... Sokolov, S. J. (1997). Palaeomagnetic studies of Proterozoic rocks from the Lake Onega region, southeast Fennoscandian Shield. *Geophysical Journal International*, 129(3), 518—530. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04491.x>.
- Elming, S. A., Kravchenko, S. N., Layer, P., Rusakov, O. M., Glevasskaya, A. M., Mikhailova, N. P., & Bachtadse, V. (2007). Palaeomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up. *Journal of the Geological Society*, 164(5), 969—982. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-163>.
- Elming, S.-A., Mikhailova, N. P. & Kravchenko, S. N. (2001). Palaeomagnetism of Proterozoic rocks from the Ukrainian Shield: new tectonic reconstruction of the Ukrainian and Fennoscandian shields. *Tectonophysics*, 339(1-2), 19—38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00032-4).
- Elming, S.-A., Mikhailova, N. P. & Kravchenko, S. N. (1998). The Consolidation of the East European Craton: a paleomagnetic analysis of Proterozoic rocks from the Ukrainian Shield and tectonic reconstructions versus Fennoscandia. *Geophysical Journal*, 20(4), 71—74.
- Elming, S.-A., Pesonen, L. J., Leino, M., Khramov, A. N., Mikhailova, N. P., Krasnova, A. F., ... Terho, M. (1993). The continental drift of the Fennoscandian and Ukrainian Shields during the Precambrian. *Tectonophysics*, 223(3-4), 177—198. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90137-9](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(93)90137-9).
- Elming, S.-A., Shumlyansky, L., Kravchenko, S., Layer, P. & Söderlund, U. (2010). Proterozoic Basic dykes in the Ukrainian Shield: A palaeomagnetic, geochronologic and geochemical study — The accretion of the Ukrainian Shield to Fennoscandia. *Precambrian Research*, 178(1), 119—135. <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.001>.
- Fedotova, M. A., Khramov, A. N., Pisakin, B. N. & Priyatkin, A. A. (1999). Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield. *Geophysical Journal International*, 137(3), 691—712. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00817.x>.
- Gallet, Y., Pavlov, V., Halverson, G., & Hulot, G. (2012). Toward constraining the long-term reversing behavior of the geodynamo: A new "Maya" superchron ~1 billion years ago from the magnetostratigraphy of the Kartochka Formation (southwestern Siberia). *Earth and Planetary Science Letters*, 229-340, 117—126. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.049>.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. & Ogg, G. M. (Eds). (2012). *The Geologic Time Scale 2012* (Vol. 1). Boston: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.01001-5>.
- Halls, H. C., Lovette, A., Hamilton, M. & Söderlund, U. (2015). A paleomagnetic and U-Pb geochronology study of the western end of the Grenville dyke swarm: Rapid changes in paleomagnetic field direction at ca. 585 Ma related to polarity reversals? *Precambrian Research*, 257, 137—166. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.029>.
- Iosifidi, A. G., Bachtadse, V., Taiat, J., Khramov, A. N. & Kuznetsova, A. V. (2001). Palaeomagnetic data from Vendian rocks from the Ukraine. XXVI EGS General Assembly, Nice 2000. *Geophysical Research Abstracts*, (3), 1206.
- Iosifidi, A. G., Khramov, A. N. & Bachtadse, V. (2005). Multicomponent magnetization of Ven-

- dian sedimentary rocks in Podolia, Ukraine. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7(1), 1—14.
- Jarboe, N.A., Koppers, A.A., Tauхе, L., Minnett, R. & Constable, C. (2012). *The online MagIC Database: data archiving, compilation, and visualization for the geomagnetic, paleomagnetic and rock magnetic communities*. Abstract GP31A-1063, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco.
- Jeleńska, M., Kądziałko-Hofmokl, M., Bakhmutov, V., Poliachenko, I. & Ziółkowski, P. (2014). Palaeomagnetic and rock magnetic study of Lower Devonian sediments from Podolia, SW Ukraine: remagnetization problems. *Geophysical Journal International*, 200(1), 557—573. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu411>.
- Kirschvink, J.L., Ripperdan, R.L., Evans D.A. (1997). Evidence for a Large-Scale Reorganization of Early Cambrian Continental Masses by Inertial Interchange True Polar Wander. *Science*, 277, 541—545. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.541>.
- Kravchenko, S.N. (2005). First estimate for the age of a mesoproterozoic palaeomagnetic pole from the Volodarsk-Volynsky Massif, The Ukrainian Shield. *Studia Geophysica et Geodae-tica*, 49(2), 177—190. <https://doi.org/10.1007/s11200-005-0004-6>.
- Levashova, N.M., Bazhenov, M.L., Meert, J.G., Danukalov, K.N., Golovanova, I.V., Kuznetsov, N.B. & Fedorova, N.M. (2015). Paleomagnetism of upper Ediacaran clastics from the South Urals: Implications to paleogeography of Baltica and the opening of the Iapetus Ocean. *Gondwana Research*, 28(1), 191—208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.04.012>.
- Meert, J.G. (1999). A paleomagnetic analysis of Cambrian true polar wander. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1-2), 131—144. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00042-4).
- Nawrocki, J., Boguckij, A. & Katinas, V. (2004). New late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ. *Geological Quarterly*, 48(4), 309—316.
- Pisarevsky, S.A., Komissarova, R.A. & Khramov, A.N. (2001). Reply to comment by J.G. Meert and R. Van der Voo on "New palaeomagnetic result from Vendian red sediments in Cisbaikalia and the problem of the relationship of Siberia and Laurentia in the Vendian". *Geophysical Journal International*, 146(3), 871—873. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01475.x>.
- Pisarevsky, S.A. & McElhinny, M.W. (2003). Global Paleomagnetic Data Base developed into its visual form. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 84(20), 192—192. <https://doi.org/10.1029/2003EO200007>.
- Pisarevsky, S.A. & Sokolov, S.J. (2001). The magnetostratigraphy and a 1780 Ma palaeomagnetic pole from the red sandstones of the Vazhinka River section, Karelia, Russia. *Geophysical Journal International*, 146(2), 531—538. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01479.x>.
- Shcherbakova, V., Bakhmutov, V., Shcherbakov, V. & Zhidkov, G. (2018). Extremely low palaeointensities in the Neoproterozoic obtained on volcanic rocks from the Ukrainian Shield. EGU General Assembly 2018. *Geophysical Research Abstracts*, 20.
- Shumlyanskyy, L., Hawkesworth, C., Billström, K., Bogdanova, S., Mytrokhyn, O., Romer, R., ... Bilan, O. (2017). The origin of the Palaeoproterozoic AMCG complexes in the Ukrainian Shield: New U-Pb ages and Hf isotopes in zircon. *Precambrian Research*, 292, 216—239. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.02.009>.
- Torsvik, T.H., Meert J.G. & Smethurst M.A. (1998). Polar Wander and the Cambrian. *Science*, 279, 9. <https://doi.org/10.1126/science.279.5347.9a>.
- Torsvik, T.H., Müller, R.D., Van der Voo, R., Steinberger, B. & Gaina, C. (2008). Global plate motion frames: Toward a unified model. *Reviews of Geophysics*, 46(3). <http://dx.doi.org/10.1029/2007RG000227>.
- Torsvik, T., Van Der Voo, R., Preeden, U., Mac Niocaill, C., Steinberger, B., Doubrovine, P.V.,

- ... Cocks, L.R. M. (2012). Phanerozoic polar wander, paleogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*, 114(3-4), 325—368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
- Van der Voo, R. (1993). *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans*. London: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524936>.
- Van der Voo, R. (1990). The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 184(1), 1—9. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90116-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90116-P).
- Veikkolainen, T., Pesonen, L. J. & Evans, D.A.D. (2014). PALEOMAGIA: A PHP/MYSQL database of the Precambrian paleomagnetic data. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 58(3), 425—441. <https://doi.org/10.1007/s11200-013-0382-0>.
- Veselovskiy, R. V. (2013) Paleomagnetism, geochronology and magnetic mineralogy of Devonian dikes from the Kola alkaline province (NE Fennoscandian Shield). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(4), 526—547. <https://doi.org/10.1134/S106935131303018X>.