

<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0167>

## NEW PALEOMAGNETIC DATA ON THE SILURIAN AND DEVONIAN SEDIMENTARY ROCKS FROM PODOLIA, SW UKRAINE, AND KINEMATICS OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM IN THE MIDDLE PALEOZOIC

V. G. Bakhmutov, I. B. Poliachenko

*Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

**Abstract:** Paleomagnetic data are the priority source of information for global paleotectonic reconstructions representing horizontal movements of the crustal blocks. Upon receipt of new paleomagnetic data, kinematic models of the East European platform in the Paleozoic are regularly revised and improved. The article presents results of the paleomagnetic study of sedimentary gray-colored and red beds of the Silurian and Lower Devonian sequences located in the Dniester river basin, Podolia region, SW Ukraine. The study covered 17 outcrops that are stratigraphically correlated with the Wenlock, Ludlow, Pridoli stages of the Silurian and the Lochkovian stage of the Devon. Over 400 samples of grey limestone, argillite, dolomite, red limestone and sandstone were analyzed, and two components of natural remnant magnetization (NRM) were revealed. The first component with SSW declination and negative inclination is revealed in the majority of the samples during AF- and T-magnetic cleaning. Its pole positions, that are calculated separately for each series, are trending to the Permian segment of the apparent polar wander path (APWP) published by Torsvik et al. [2012] for Baltica / Stable Europe. Considering its chemical origin, this NRM component is related to formation of authigenic minerals due to rock remagnetization. The second component is revealed only in some samples taken from the red beds (during thermal demagnetization in the range of unblocking temperatures from 590 to 690 °C) and in few samples of grey limestone (in AF fields from 30 to 70 mT or in the range of unblocking temperatures from 300 to 460 °C). This component has SW declination and positive inclination, goes to the origin of coordinates of the diagrams, and has all the indicators of primary magnetization of sediments. Calculated positions of the poles (0 °S and 329 °E for grey limestone of the Tiverskaya series, 2.3 °S and 338.4 °E for red beds of the Dniestrovskaya series, etc.) are well correlated with the Devonian segments of APWP for Baltica / Stable Europe. The same is true for the Silurian poles. The new results suggest that in the Ludlow, the East European platform was located at the near-equatorial latitudes of the Southern Hemisphere, and in the Pridoli, it moved to the north towards the equatorial latitudes of the Southern Hemisphere. Later on, the drifting mode was changed, and the platform moved to the south. In the Lochkovian, its position was stabilized at the equatorial latitudes of the Southern Hemisphere. Drifting of the platform can be described by counterclockwise rotation by 16° around the Euler pole ( $\Phi=34^\circ\text{S}$ ,  $\Lambda=247^\circ\text{E}$ ).

**Key words:** paleomagnetism, Middle Paleozoic, East European platform, apparent polar wander path (APWP), paleotectonic reconstruction.

**Recommended by** D.P. Gladkochub

**Citation:** Bakhmutov V.G., Poliachenko I.B. 2014. New paleomagnetic data on the Silurian and Devonian sedimentary rocks from Podolia, SW Ukraine, and kinematics of the East European platform in the Middle Paleozoic. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 1045–1058. doi:10.5800/GT-2014-5-4-0167.

## НОВЫЕ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИЛУРИЙСКИМ И ДЕВОНСКИМ ОСАДОЧНЫМ ПОРОДАМ ПОДОЛИИ (ЮГО-ЗАПАДНАЯ УКРАИНА) И КИНЕМАТИКА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ В СРЕДНЕМ ПАЛЕОЗОЕ

В. Г. Бахмутов, Е. Б. Поляченко

*Институт геофизики им. С.И. Субботина Национальной академии наук Украины, Киев, Украина*

**Аннотация:** Палеомагнитным данным отводится приоритетная роль при глобальных палеотектонических реконструкциях, которые отображают горизонтальные перемещения отдельных блоков земной коры. Построенные на их основе кинематические модели миграции Восточно-Европейской платформы (ВЕП) в палеозое по мере поступления нового фактического материала постоянно уточняются. В работе приводятся результаты палеомагнитных исследований осадочных сероцветных и красноцветных отложений силура и нижнего девона юго-запада Украины (район Подолии, бассейн реки Днестр). Для палеомагнитных исследований были выбраны 17 обнажений, которые стратиграфически сопоставимы с венлокским, лудловским, пржидольским отделами силура и лохковским ярусом девона и представлены сероцветными известняками, аргиллитами, доломитами и красноцветными известняками и песчаниками. В результате исследований коллекции более 400 образцов были выделены две компоненты естественной остаточной намагниченности (ЕОН). Первая выделяется на большинстве образцов при Н- и Т-чистках, имеет юг-юго-западное склонение и отрицательное наклонение. Соответствующие ей палеомагнитные полюсы, рассчитанные для каждой серии отдельно, тяготеют к пермскому сегменту траектории кажущейся миграции полюса (ТКМП) для Балтики / стабильной Европы [Torsvik et al., 2012]. Эта компонента химической природы связана с образованием аутигенных минералов при перемагничивании пород. Другая компонента, выделяемая в только в отдельных образцах красноцветов (при температурной чистке в диапазоне деблокирующих температур 590–690 °С) и в единичных образцах сероцветов (в переменных полях 30–70 мТл либо в диапазоне деблокирующих температур 300–460 °С), имеет юго-западное склонение и положительное наклонение, идет к началу координат диаграмм и характеризуется всеми признаками первичной намагниченности. Рассчитанные палеомагнитные полюса (0 °S, 329 °E для сероцветов тиверской серии, 2.3 °S, 338.4 °E для красноцветов днестровской серии и др.) хорошо согласуются с нижедевонским фрагментом ТКМП для Балтики / стабильной Европы. Это же справедливо и для силурийских полюсов. Согласно новым результатам, в лудлове ВЕП располагалась в приэкваториальных широтах Южного полушария, в пржидольское время перемещалась к северу в экваториальные широты Южного полушария. Далее характер дрейфа изменяется – происходит перемещение уже в южном направлении, и в лохковское время положение ВЕП стабилизируется в приэкваториальных широтах Южного полушария. Характер дрейфа платформы можно описать поворотом против часовой стрелки на 16° вокруг полюса Эйлера, с координатами  $\Phi=34^\circ\text{S}$ ,  $\Lambda=247^\circ\text{E}$ .

**Ключевые слова:** палеомагнетизм, средний палеозой, Восточно-Европейская платформа, траектория кажущейся миграции полюса, палеотектонические реконструкции.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

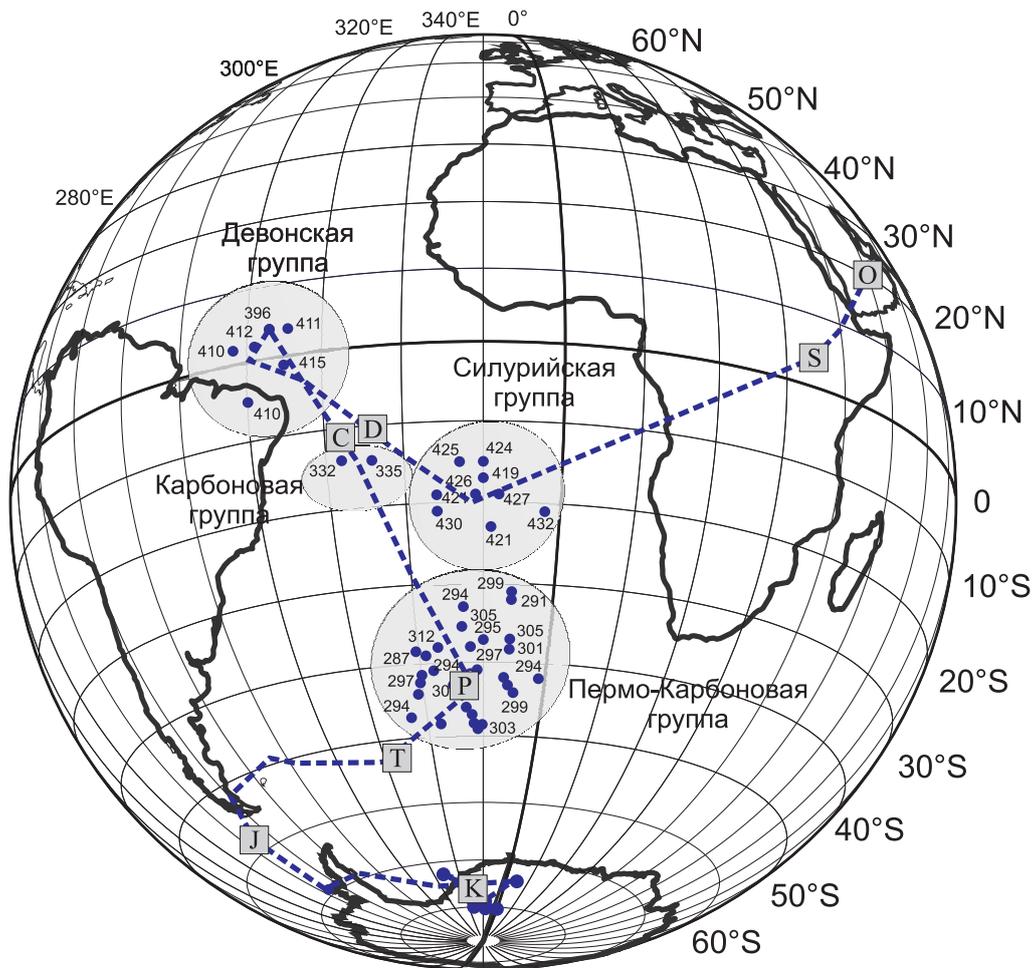
Палеомагнитным данным отводится приоритетная роль при глобальных палеотектонических реконструкциях, которые отображают горизонтальные и ротационные перемещения отдельных блоков земной коры. При этом решается ряд геологических задач, среди которых можно выделить синхронизацию и корреляцию магматических проявлений на консолидированных платформенных участках, определение условий тепловой истории метаморфизма горных пород, исследование динамических аспектов тектоники жестких блоков земной коры, палеотектонические реконструкции и др.

В работе группы авторов [Torsvik et al., 2012] были рассмотрены геодинамические модели многих блоков земной коры в фанерозое. В ряде случаев результаты существенно отличаются от данных, представленных в более ранних работах (см., например [Torsvik et al., 1996]), в том числе для среднепалеозойского сегмента ТКМП для Балтики [Lubnina et al., 2007]. Для их тестирования необходимо привлечение новых палеомагнитных определений.

Нужно отметить, что этот палеозойский сегмент ТКМП для Балтики был построен на основе небольшого количества надежных палеомагнитных определе-

ний, и для его уточнения необходимо привлечение новых данных. Особенно мало определений имеется для его девонской и карбоновой частей (рис. 1). Здесь палеомагнитные полюсы получены по результатам исследований на Британских островах и Скандинавии, а также по девонским отложениям Подолии [Torsvik et al., 2012]. Несколько лучше ситуация с силурийским фрагментом, построенным по результатам четырех определений в Шотландии, четырех – на Скандинавском полуострове и двух – в Подолии. Представленные на рис. 1 палеомагнитные полюсы располагаются близко друг к другу, образуя своего рода «облака».

Таким образом, малое количество (либо вовсе отсутствие) надежных палеомагнитных определений вносит неоднозначность в модель дрейфа ВЕП в палеозое и требует привлечения новых данных. Нами были выполнены исследования опорных разрезов сероцветных и красноцветных отложений силура – нижнего девона Подолии (Юго-Западная Украина, долина реки Днестр). Они хорошо обнажены, имеют надежные стратиграфические привязки, характеризуются обилием ископаемой флоры и фауны, практически не затронуты процессами метаморфизма и, как показывают результаты предыдущих палеомагнитных исследований, являются палеомагнитно-информативными [Smethurst, Khramov, 1992; Lubnina et al., 2007].



**Рис. 1.** Силурийские, девонские, карбоновые и пермские полюсы, оцениваемые как наиболее надежные (серые овалы), и один из вариантов траектории ТКМП (пунктирная линия) для Балтики / стабильной Европы в соответствии с [Torsvik et al., 2012]. Возраст полюсов приведен в млн лет назад.

**Fig. 1.** The Silurian, Devonian, Carbonian and Permian poles estimated with high reliability (gray ellipses), and a trend of APWP (dotted line) for Baltica / Stable Europe, according to [Torsvik et al., 2012]. Ages of poles in Ma.

## 2. ГЕОЛОГИЯ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Палеозойские отложения широко распространены на юго-западе ВЕП. Они представлены терригенно-карбонатными породами, мощность которых увеличивается в западном направлении, и на территории Подолии соответствуют наиболее полным седиментационным циклам [Nikiforova, Predtechenskiy, 1972; Tsegelnyuk et al., 1983]. В геологическом плане палеозой здесь разделяется на два структурных этажа. Нижний слагают отложения верхнего протерозоя (венд) и палеозоя (нижний кембрий, верхний ордовик, силур и нижний девон). Они вскрываются в долине реки Днестр и по ее левым притокам (рис. 2). Здесь силурийские отложения с размытом залегают на отложениях ордовика, кембрия, иногда венда, а выше согласно перекрываются красноцветными породами нижнего девона. Палеозойский разрез Подолии является крупным циклом морского седиментогенеза, начало кото-

рого можно связать с ордовик-силурийской трансгрессией, а конец – с установлением континентальных условий осадконакопления в нижнем девоне. Верхний этаж представлен отложениями мела (сеноман) и неогена (тортон и сармат).

Разрез силура Подолии представлен мощной толщей (более 400 м) терригенно-карбонатных пород, разделенных седиментационными циклами в ранге серий. Яругская серия представлена отложениями глубоководного шельфа, выше по разрезу глубоководные фации сменяются мелководными, отражая постепенную регрессию моря. Малиновецкая серия представлена отложениями мелководно-шельфового бассейна с характерными породами волноприбойных зон (по составу это комковатые и плитчатые известняки). Скальская серия отражает конечную стадию карбонатного осадконакопления, представлена в основном лагунными отложениями (доломитами, домеритами и доломитизированными известняками) и



**Рис. 2.** Геологическая схема палеозоя среднего Приднестровья (со снятым мезо-кайнозойским чехлом).

Исследованные разрезы сероцветных (красноцветных) пород приведены белыми (черными) звездами. Номера разрезов сероцветных пород нижнего девона приведены в белых квадратах в соответствии с их геологическим описанием в [Nikiforova, Predtechenskiy, 1972]. Буквами латинского алфавита обозначены разрезы сероцветных пород силура в соответствии с [Jeleńska et al., 2005]. Цифрами 1 и 2 пронумерованы разрезы красноцветов нижнего девона, цифрами 3 и 4 – разрезы красноцветов верхнего силура. Буквенные обозначения серий: D<sub>1</sub>dn – днестровская, D<sub>1</sub>tv – тиверская, S<sub>2</sub>sk – скальская, S<sub>2</sub>ml – малиновецкая, S<sub>1-2</sub>jr – яругская, O<sub>2-3</sub>mld – молодовская.

**Fig. 2.** The Paleozoic of the Middle Pridnestrovia (without Meso-Cenozoic cover).

In the geological scheme, white (black) stars show studied cross-sections of grey (red beds) rocks. Numbers of the Low Devonian rock cross-sections are shown in white boxes according to their geological descriptions in [Nikiforova, Predtechenskiy, 1972]. Cross-sections of Silurian grey rocks are marked by Latin letters according to [Jeleńska et al., 2005]. Cross-sections of red beds: 1 and 2 – Low Devonian; 3 and 4 – Upper Silurian. Series: D<sub>1</sub>dn – Dnestrovskaya, D<sub>1</sub>tv – Tiverskaya, S<sub>2</sub>sk – Skalskaya, S<sub>2</sub>ml – Malinovetskaya, S<sub>1-2</sub>jr – Yarugskaya, O<sub>2-3</sub>mld – Molodovskaya.

реже мелководными, шельфовыми (комковатые глинистые известняки, реже биогермные) [Nikiforova, Predtechenskiy, 1972]. Красноцветные отложения верхнего силура (в составе верхнеконовской подсвиты малиновецкой серии) представлены переслаиванием доломитов, домеритов и известняков.

Разрез нижнего девона Подолии слагают две серии: тиверская и днестровская. Первая является продолжением силурийского цикла осадконакопления и представлена известняками и аргиллитами, вторая – результатом установления континентального режима осадконакопления в условиях засушливого климата.

Днестровская серия подразделяется на четыре свиты: устечковская, хмелевская, стрыпская и смерклевская. Условия седиментации осадков днестровской серии характерны для структуры предгорной впадины и представлены чередованием красноцветных аргиллитов и песчаников мощностью до 1100 м в Львовском палеозойском прогибе [Tsegelnyuk et al., 1983]. Красноцветная формация устечковской свиты исследована нами на двух разрезах, где отложения представлены переслаиванием красно-бурых песчаников и алевроаргиллитов мощностью около 50 м.

Таким образом сероцветные и красноцветные отложения силура – нижнего девона Подолии формируют непрерывный разрез фашиально разных осадочных толщ, который и является объектом наших палеомагнитных исследований.

По отношению к геологической (геохронологической) шкале яругская серия верхнего силура сопоставима с венлоком (возраст нижней части оценивается в 428 млн лет), а устечковская свита нижнего девона сопоставляется с верхней частью лохковского яруса (возраст около 412–411 млн лет [Gradstein et al., 2012]).

### 3. МЕТОДИКА РАБОТ

Ориентированные образцы из 17 обнажений отбирались вручную штупами либо выбуривались минибуром; из них выпиливались стандартные кубики (либо цилиндры) с ребром 20 мм (либо диаметром 24 мм). Полный цикл магнитных чисток был выполнен на более чем 400 образцах. Лабораторные палеомагнитные исследования проводились по стандартной методике [Khranov, 1982; Pecherskiy, Didenko, 1995] и включали ступенчатое размагничивание образцов температурой и переменным магнитным полем, определение компонент остаточной намагниченности, оценку их стабильности и палеомагнитной информативности. Отдельно выполнялись комплексные магнитно-минералогические исследования. На последнем этапе проводились расчеты палеомагнитных полюсов для каждой стратиграфической серии. Более подробно результаты исследований изложены в работах [Jeleńska et al., 2005, 2010; Bakmutov et al., 2012; Poliachenko et al., 2014], и ниже мы остановимся только на отдельных ключевых моментах.

Вопрос о пригодности осадочных пород Подолии для получения надежных палеомагнитных определений весьма непростой. Выполнение полевых тестов (складки, конгломератов) в этом районе проблематично ввиду отсутствия (по крайней мере авторам они не известны) подходящих для тестов геологических объектов. К тому же величины ЕОН сероцветных пород Подолии настолько малы, что возникают трудности даже при измерениях на высокочувствительном SQUID-магнитометре. Ситуация с красноцветными породами значительно лучше, величины намагниченности образцов на порядок выше, и проблем с надежным выделением информативного «сигнала» при магнитных чистках не возникает.

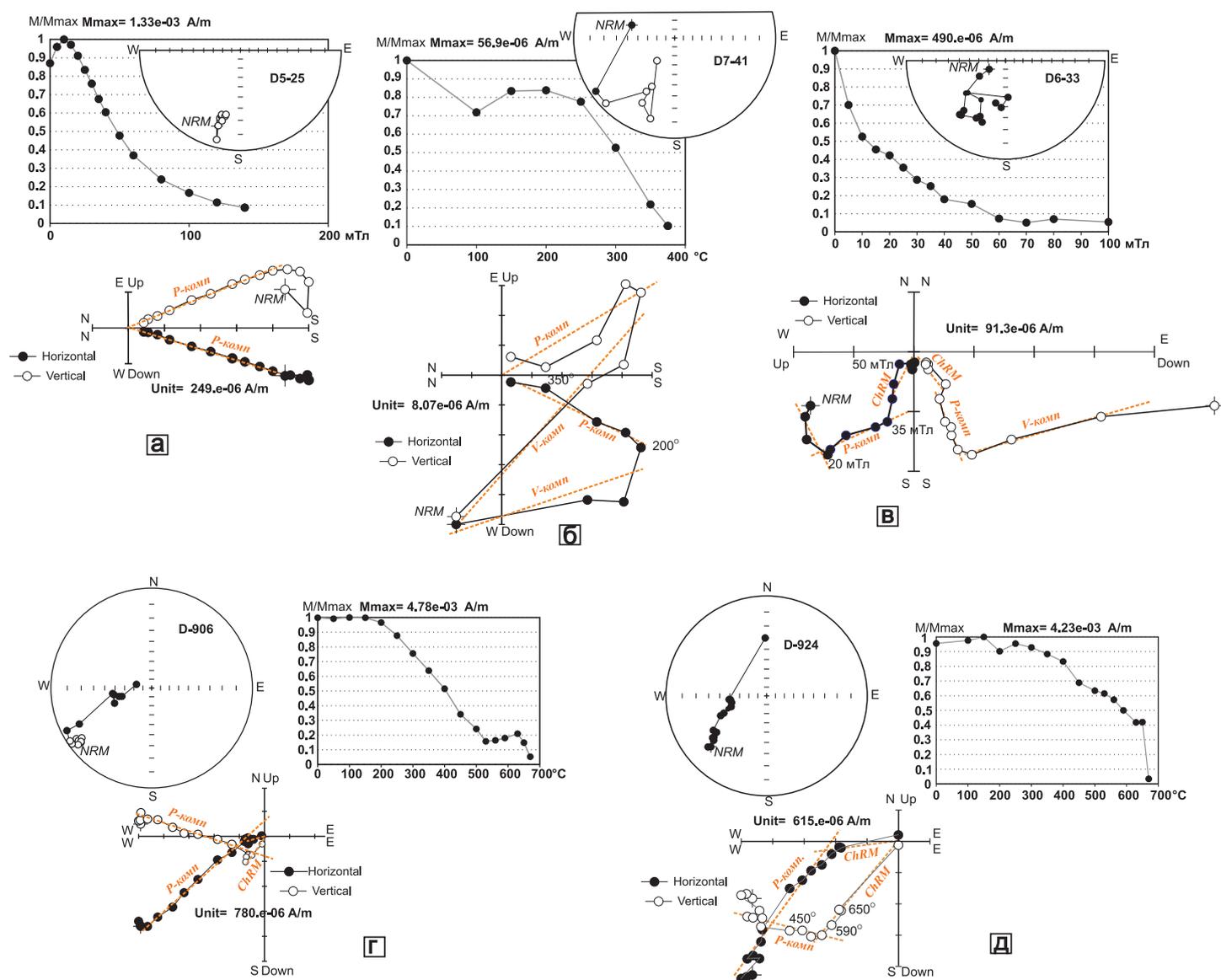
ности образцов на порядок выше, и проблем с надежным выделением информативного «сигнала» при магнитных чистках не возникает.

Измерения коллекции выполнялись на аппаратуре Института геофизики Польской академии наук, г. Варшава (2G SQUID DC магнитометр с приставкой для размагничивания переменным магнитным полем), и Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины (спин-магнитометр JR-6). Для температурной чистки в обеих лабораториях использовались экранированные печи MMLTD. И магнитометры, и печи помещены в немагнитные комнаты MMLFC. Измерение магнитной восприимчивости (МВ) выполнялось на каппа-метрах KLY-2 и MFK-1 при комнатной температуре после каждой ступени термомагнитной чистки для мониторинга минералогических изменений в образцах при нагревах. Параметры анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) вычислялись и анализировались по программам ANISO [Jelinek, 1977]. Результаты размагничивания анализировались методом главных компонент [Kirshvink, 1980] по программе Remasoft 3.0 [Chadima, Hroudá, 2006].

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вся коллекция образцов была подвергнута серии последовательных нагревов при 10–12 ступенях размагничивания – для сероцветов до температур 420–460 °С, при которых величина намагниченности падала почти до нуля и/или происходили минералогические изменения в образцах (на что указывает резкое возрастание МВ). Образцы-дубли размагничивались переменным магнитным полем (15–20 ступеней размагничивания) при максимальных значениях поля 100–140 мТл. Для образцов красноцветов размагничивание переменным магнитным полем, как и следовало ожидать, оказалось неэффективным. Образцы отличались повышенной магнитной «жесткостью», при полях 100 мТл они теряли около 10 % ЕОН. Для красноцветов эффективным было 15–20-ступенчатое размагничивание до температур 680–690 °С. При этом в диапазоне температур от 590–610 до 690 °С выделялась прямолинейная, спадающая в начало координат компонента намагниченности (характеристическая компонента намагниченности ChRM).

В образцах сероцветов было выделено три компоненты намагниченности [Bakmutov et al., 2012]. При низких температурах (до 200–250 °С) и переменных магнитных полях (до 15–20 мТл) выделяется низкостабильная компонента (V-компонента) прямой полярности, направление которой близко к направлению современного магнитного поля. Ее природа, вероятно, вязкая, и далее она не рассматривается. Другая, более стабильная, компонента юг-юго-западного склонения и отрицательного наклонения четко выделяется разными методами магнитной чистки, как при размагни-



**Рис. 3.** Примеры ступенчатого размагничивания образцов сероцветных (а, б, в) и красноватых (г, д) пород переменным магнитным полем (а, в) и температурой (б, г, д); на образцах выделены вязкая (V-комн), «пермская» (P-комн) и наиболее стабильная характеристическая (ChRM) компоненты намагниченности.

Приведены стереограммы (полые/залитые круги – проекции векторов на верхнюю/нижнюю полусферу) и диаграммы Зийдверельда измеренных направлений намагниченности и выделенных компонент, а также нормированные кривые размагничивания ЕОН. Залитыми (полыми) кругами на диаграммах Зийдверельда обозначены проекции на горизонтальную (вертикальную) плоскость, пунктирными линиями приведены выделенные компоненты намагниченности.

**Fig. 3.** Examples of staged demagnetization of grey (a, б, в) and red (г, д) rock by impacts of alternating magnetic fields (a, в) temperature (б, г, д) with viscous (V-комн), 'Permian' (P-комн) and the most stable (ChRM) magnetization components.

Stereograms (open/solid circles show projects of vectors to the upper/lower hemisphere) and Zijderveld diagrams of measured magnetization directions and revealed components, and normalized NRM demagnetization curves. In Zijderveld diagrams, open/closed circles show projections to horizontal/vertical planes; dotted lines show revealed magnetization components.

чивании переменным полем (рис. 3, а), так и температурой (рис. 3, б). Ее направление близко к направлению «I» (или «P-C») компоненты, которая выделяется на многих верхнепалеозойских разрезах осадочных пород ВЕП [Smethurst, Khrarov, 1992; Lubnina et al., 2007], и ее связывают с перемагничиванием пород в верхнем палеозое (в ранней перми). В отдельных об-

разцах при размагничивании переменным магнитным полем в диапазоне 30–70 мТл и выше (рис. 3, в) либо в диапазоне температур 300–460 °С, наряду с «пермской» компонентой, выделяется третья компонента ЮЗ склонения и положительного наклонения, которая идет к началу координат (ChRM). Ее направление близко к ранее выделенному в этом районе [Smethurst,

[Khramov, 1992; Lubnina et al., 2007] «девонскому» направлению.

По результатам магнитной чистки образцов красноцветов также выделяются три компонента намагниченности. Низкотемпературная компонента выделяется практически во всех образцах в диапазоне 100–350 °С, ее направление близко к направлению современного магнитного поля, природа, вероятно, вязкая (V-компонента), и далее она не рассматривается. Среднетемпературная компонента выделяется в подавляющем большинстве образцов при температурах до 600 °С (рис. 3, з, д), имеет юг-юго-западное склонение и отрицательное наклонение, которое очень близко к направлению, выделенному по сероцветам. Третья из компонент (ChRM) наиболее стабильна, выделяется примерно в 20 % образцов при температурах >600 °С (рис. 3, з, д), идет к началу координат и характеризуется как прямой, так и обратной полярностью.

Расчет средних палеомагнитных направлений для компонент выполнялся отдельно для каждой серии либо свиты (таблица), а координаты палеомагнитных полюсов сравнивались с палеозойским фрагментом ТКМП для Балтики / стабильной Европы [Torsvik et al., 2012] (рис. 4). Анализ этих результатов позволяет сделать вывод, что выделенная как по сероцветам, так и по красноцветам ChRM попадает на силурийско-девонский фрагмент ТКМП, а менее стабильная компонента – на пермский (или близкий к карбоновому) сегмент. Возникает вопрос, является ли ChRM первичной намагниченностью и с какими магнитными минералами она связана.

Для определения носителей остаточной намагниченности выполнялись исследования шлифов под микроскопом, микроаналитические исследования методами электронно-микронного анализа, а также применялась стандартная методика магнитно-минералогических исследований, включающая разные методы как термомангнитного анализа, так и безнагревные методы (измерение параметров петли гистерезиса). Результаты этих исследований приведены в работах [Jeleńska et al., 2005, 2010; Bakhmutov et al., 2012; Poliachenko et al., 2014].

Результаты по сероцветам согласуются с ранее полученными для этого района данными [Jeleńska et al., 2005, Lubnina et al., 2007] и указывают на магнетит как на основной носитель намагниченности. При этом в образцах преобладает аутигенный магнетит, который вносит основной вклад в ЕОН, и с ним связана «пермская» компонента намагниченности. Но в отдельных образцах также присутствует аллотигенный магнетит, с которым связана характеристическая компонента намагниченности, выделяемая нами как силурийская (девонская). В пользу последнего свидетельствует: а) ее выделение исключительно в слоях с сохраненной осадочной структурой (по результатам анализа АМВ образцов); б) ее направление, совпадающее с силурийскими – нижнедевонскими полюсами

для Балтики [Torsvik et al., 2012]; в) биполярность (в том числе с учетом других данных, приведенных в [Lubnina et al., 2007; Poliachenko et al., 2014]). Таким образом, мы считаем, что эта компонента имеет все признаки первичной и обусловлена зернами детритового магнетита.

Для красноцветов, характеризующихся высокой магнитной «жесткостью» и более высокими деблокирующими температурами, при которых выделяется ChRM, очевидно, что носители намагниченности здесь другие и, в первую очередь, можно ожидать присутствия гематита (как наиболее вероятного магнитного минерала красноцветов). Здесь относительно «высокотемпературная» компонента выделяется только в отдельных образцах на хвостах кривых размагничивания в диапазоне деблокирующих температур 590–690 °С (см. рис. 3, з, д), и температура деблокирования около 680 °С указывает на гематит. Другая, относительно «низкотемпературная», компонента выделяется почти во всех образцах, вносит основной вклад в ЕОН и характеризуется деблокирующими температурами около 600 °С. Такая температура характерна для нестехиометрического магнетита, слегка окисленного до маггемита, однако крайняя жесткость ЕОН к размагничиванию переменным магнитным полем исключает данную интерпретацию. Ответ на вопрос, какой магнитный носитель у этой компоненты и каково его происхождение, дают результаты электронной микроскопии [Jeleńska et al., 2010]. Они показывают, что гематит здесь присутствует как минимум в трех генерациях: 1) аллотигенные детритовые зерна (до 100 мкм) со сростками ильменита типа «tiger striped», с незначительным содержанием Ti (до 3 %); 2) аутигенные кристаллы (размер 1–2 мкм), слагающие цемент; 3) неидентифицированные зерна оксидов железа (возможно титаногематита), сформировавшиеся при распаде детритовых зерен хлорита и биотита. Гематит со сростками ильменита является наиболее подходящим кандидатом в носители детритовой намагниченности [Butler, 1992; Kodama, 2012]. Такие зерна-проростки образуются в ходе высокотемпературных процессов в изверженных породах и далее переотлагаются в осадочных бассейнах, формируя стабильную первичную компоненту намагниченности в породах.

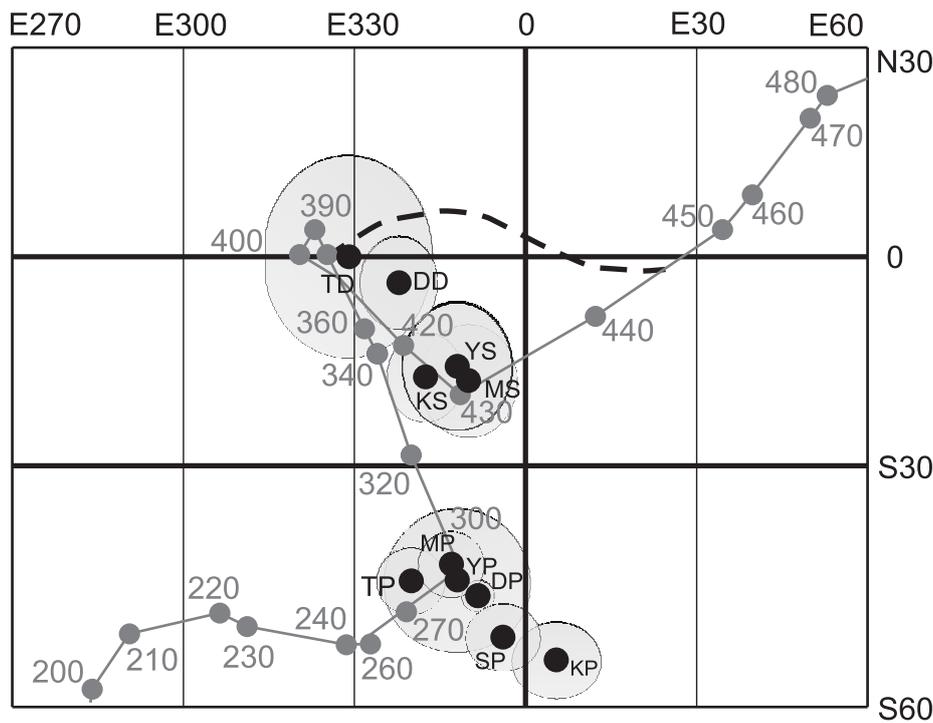
Таким образом, ChRM-компонента красноцветов имеет следующие признаки первичной намагниченности: а) ее носителем являются зерна детритового гематита (с незначительной примесью титана), природа намагниченности – ориентационная, о чем косвенно свидетельствуют результаты анализа АМВ, типичной для осадочных структур; б) соответствие ее направления нижнедевонским полюсам для Балтики / стабильной Европы [Torsvik et al., 2012]. Отметим, что полученный нами нижнедевонский полюс ( $\Phi=2.3^\circ$ ,  $\Lambda=338.4^\circ$ Е) несколько отличается от палеомагнитного полюса, рассчитанного по высокостабильной компоненте 25 образцов девонских красноцветов Подолии

Палеомагнитные направления и полюсы для компонент намагниченности силурийских – нижнедевонских осадочных толщ Подолии  
 Paleomagnetic directions and poles for magnetization components of the Silurian – Low Devonian sedimentary beds of Podolia

Индекс	Стратиграфия	Возраст в соответствии с ТКМП [Torsvik et al., 2012]	N/n	D	I	$\alpha_{95}^{\circ}$	k	$\Phi$ (S°)	$\Lambda$ (E°)	dp°	dm°	$\varphi_m^{\circ}$
УР	Яругская серия (S <sub>1-2</sub> Jr)	Пермь	15/11	206	-19	9	27	45	348	4.9	9.4	-9.8
МР	Малиновецкая серия (S <sub>2</sub> ml)	Пермь	14/13	208	-16	4.2	99	43	347	2.2	4.3	-8.2
КР	Коновская свита (S <sub>2</sub> k)	Пермь	33/10	192	-26	5.9	67	53.4	5.9	3.4	6.4	-13.7
SP	Скальская серия (S <sub>2</sub> sk)	Пермь	15/15	198	-26	4.0	91	52	356	2.3	4.3	-13.7
ТР	Тиверская серия (D <sub>1</sub> tv)	Пермь	74/38	211	-22	4.2	32	45	340	2.3	4.4	-11.4
DP	Днепровская серия (D <sub>1</sub> dn)	Пермь	201/174	202.7	-19	1.4	56	47	351.5	0.8	1.5	-9.8
SC	Скальская серия (S <sub>2</sub> sk)	Карбон ?	15/4	207	21	6.3	211	26	356	3.5	6.6	10.9
YS	Яругская серия (S <sub>1-2</sub> Jr)	Силур	15/8	219	32	9.2	37	16	348	5.8	10.4	17.4
MS	Малиновецкая серия (S <sub>2</sub> ml)	Силур	14/11	215	30	8.1	33	18	350	5.0	9.0	16.1
KS	Коновская свита (S <sub>2</sub> k)	Силур	33/22	44.1	-19	5.4	34	19.9	339.8	2.9	5.6	9.8
SS	Скальская серия (S <sub>2</sub> sk)	Силур	15/2	219	42							
TD	Тиверская серия (D <sub>1</sub> tv)	Девон	74/14	244	37	14.8	8	0	329	10.2	17.3	20.6
DD	Днепровская серия (D <sub>1</sub> dn)	Девон	201/49	233.7	43	7.6	8	2.3	338.4	5.8	9.4	25

П р и м е ч а н и е: индекс – в соответствии с рис. 4; N – количество независимо ориентированных образцов (соответствует количеству стратиграфических уровней); n – количество образцов, по которым выделена компонента намагниченности; D/I – склонение/наклонение средних палеомагнитных направлений (в градусах); k – кучность распределения векторов;  $\alpha_{95}^{\circ}$  – радиус круга доверия при 95%-ной вероятности для среднего направления (в градусах);  $\Phi/\Lambda$  – широта/долгота палеомагнитного полюса (в градусах); dp° – кучность распределения векторов; dm° – радиус овала доверия;  $\varphi_m^{\circ}$  – палеомагнитная широта.

N o t e: Index – see Fig. 4; N – number of independently oriented samples (corresponds to the number for stratigraphic levels); n – number of samples with identified magnetization components; D/I – declination/inclination of mean paleomagnetic directions (UoM – degree); k – clusters of vectors;  $\alpha_{95}^{\circ}$  – radius of 95% confidence cone around mean direction (UoM – degree);  $\Phi/\Lambda$  – latitude/longitude of paleomagnetic pole (UoM – degree); dp° – kurtosis of the confidence oval;  $\varphi_m^{\circ}$  – paleomagnetic latitude.



**Рис. 4.** Референтная палеозойская кривая ТКМП для Балтики / стабильной Европы [Torsvik et al., 2012]; цифрами указаны возрастные оценки (в млн лет назад).

Новые определения палеомагнитных полюсов представлены залитыми кругами (с овалами доверия  $\alpha_{95}$ ) и маркировкой в соответствии с таблицей, приведенной в тексте. Пунктирной линией приведена предлагаемая траектория по [Lubnina et al., 2007].

**Fig. 4.** The Paleozoic reference curve APWP for Baltica / Stable Europe [Torsvik et al., 2012].

Numbers show ages (Ma). New determinations of paleomagnetic poles are shown by solid circles (with confidentiality ovals,  $\alpha_{95}$ ) and marked according to the table. The dotted line shows the proposed trajectory according to [Lubnina et al., 2007].

[Smethurst et al., 1992],  $\Phi=3.7^\circ\text{N}$ ,  $\Lambda=325.5^\circ\text{E}$ ,  $dp/dm = 5.2^\circ/8.7^\circ$ .

## 5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДИСКУССИЯ

На рис. 4 новые результаты представлены в соответствии с палеозойско-мезозойским фрагментом ТКМП для Балтики / стабильной Европы [Torsvik et al., 2012]. Пунктирной линией показан предложенный в работе [Lubnina et al., 2007] альтернативный палеозойский сегмент ТКМП, который не предусматривает наличие силурийского «каспа», приближенного к «карбонным» полюсам.

Анализ наших результатов по сероцветным и красноцветным породам силура и нижнего девона, которые представлены в таблице, позволяет сделать вывод, что рассчитанные палеомагнитные полюсы по ChRM-компоненте, с учетом овалов доверия, хорошо согласуются с силурийским и девонским фрагментами ТКМП, представленными в [Torsvik et al., 2012].

Палеомагнитные полюсы по сероцветным породам яругской, малиновецкой и скальской серий силура [Jeleńska et al., 2005] тяготеют к силурийскому фраг-

менту ТКМП в интервале между 428 и 420 млн лет [Torsvik et al., 1992, 1996, 2012].

Направление ChRM-компоненты по красноцветам силура (коновская свита KS,  $D=44.1^\circ$ ,  $I=-19.0^\circ$ ) является антиполярным по отношению к направлениям, полученным нами ранее по одновозрастным силурийским сероцветам ( $D=215^\circ$ ,  $I=30^\circ$ ) [Jeleńska et al., 2005]. При этом носителями ChRM-компоненты являются разные магнитные минералы. Это косвенно свидетельствует в пользу первичности ChRM-компоненты как для красноцветных, так и для сероцветных пород малиновецкой серии верхнего силура.

Направление ChRM-компоненты для сероцветов нижнего девона ( $D=244^\circ$ ,  $I=37^\circ$ ) условно можно назвать биполярным – только в одном образце была выделена обратная полярность. Рассчитанный палеомагнитный полюс ( $\Phi=0^\circ\text{S}$ ,  $\Lambda=329^\circ\text{E}$ ) хорошо согласуется с нижнедевонским фрагментом ТКМП. Новый полюс получен на породах верхней части тиверской серии (возраст около 413 млн лет назад), но на ТКМП он попадает в интервал 407–405 млн лет назад, что несколько моложе.

Результаты по красноцветным отложениям нижнего девона Подолии (днестровская серия) показывают

направление ChRM-компоненты ( $D=233.7^\circ$ ,  $I=43^\circ$ ), близкое к направлению по сероцветным породам [Bakhmutov et al., 2012]. Эта высокостабильная компонента, носителем которой являются зерна аллотигенного гематита, дает положение палеомагнитного полюса, близкое к девонскому сегменту ТКМП, и интерпретируется нами как девонский палеомагнитный полюс.

Вопрос, является ли ChRM первичной, можно рассмотреть в двух аспектах.

Первый – в образцах красноцветов и сероцветов ChRM является первичной компонентой намагниченности. В пользу этого свидетельствует следующее. Ее направление было получено на сероцветных и красноцветных породах, которые формировались в разных условиях и существенно отличаются по составу. Соответственно носителями наиболее стабильной (характеристической) компоненты ЕОН в этих породах являются разные магнитные минералы: в сероцветных породах – магнетит, в красноцветах – гематит. Кроме того, полученные результаты согласуются с ТКМП для Балтики / стабильной Европы.

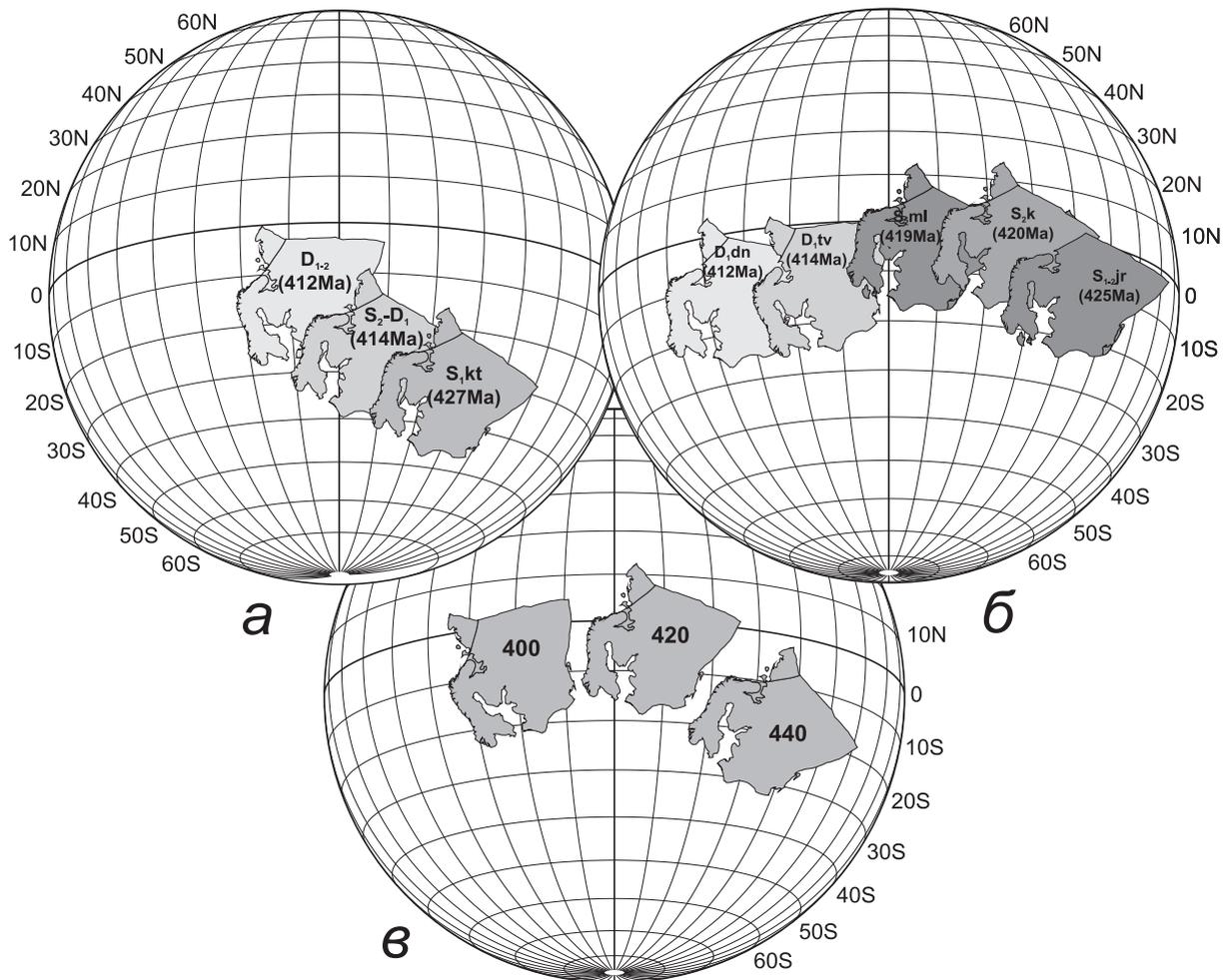
Второй аспект – мы имеем дело с полностью перемагниченными породами, и ChRM не является первичной намагниченностью. Изучая палеозойские комплексы Подолии, мы вплотную столкнулись с проблемой перемагничивания. Все изученные нами стратиграфические комплексы Подолии были перемагничены в перми, на что указывают «пермские» полюсы, полученные на различных по условиям формирования и фациальному составу горных породах. Эта компонента выделяется в подавляющем большинстве образцов как сероцветов, так и красноцветов силура и девона при размагничивании температурой, а в сероцветах – также и при размагничивании переменным магнитным полем и вносит основной вклад в ЕОН. Ее направление (и рассчитанные палеомагнитные полюсы) согласуются с ранее полученными результатами в этом районе [Smethurst, Khramov, 1992; Lubnina et al., 2007]. В этих же работах отмечалось перемагничивание палеозойских осадочных пород ВЕП в результате тектонических событий, сопровождающих позднепалеозойскую – раннемезозойскую эволюцию Восточно-Европейского кратона. В работе [Lubnina, 2009] указывается на вероятную термовязкую природу этой намагниченности, а также на широкое распространение данного типа перемагничивания в пределах ВЕП.

Расположение района исследований в южной части Вольно-Подольской плиты, с учетом ее геологической истории, подразумевает один и тот же источник перемагничивания пород. В течение перми регион мог быть подвергнут поствариссийскому воздействию флюидов. Это объясняет расположение полюсов, рассчитанных по менее стабильной компоненте, на пермской части ТКМП. Формирование этой намагниченности в сероцветных известняках и песчаниках силурий-

ского и нижнедевонского возраста можно объяснить образованием аутигенного магнетита, и в образцах в основном выделяется одна компонента намагниченности «пермского» направления. Только в отдельных образцах нами была выделена другая, «силурийско-девонская», компонента, что объясняется сохранностью зерен детритового магнетита. Таким образом здесь можно говорить о двух (или более) генетических типах магнетита, отвечающих за разные компоненты намагниченности [Jeleńska et al., 2005; Bakhmutov et al., 2012].

В большинстве образцов красноцветов также уверенно выделяется «пермская» компонента, и обусловлена она формированием мелкозернистого гематита и ультратонкого пигмента, вероятно также образовавшихся под воздействием флюидов. С другой стороны, в красноцветах процессы окисления и формирования «поздней» CRM могли продолжаться достаточно длительное время. Они могли регулироваться воздействием окисляющих флюидов, что в итоге приводило к продолжительному формированию вторичных мелких зерен гематита (и пигмента). Тем не менее здесь в некоторых образцах сохраняется первичная намагниченность, обусловленная либо терригенным гематитом, либо новообразованными в процессе литогенеза и мартитизации магнитными минералами. Последние (например, аутигенный гематит) являются носителями вторичной «ранней» химической намагниченности (CRM), сформировавшейся ненамного позднее (в геологическом масштабе времени) первичной седиментационной намагниченности (DRM) и имеющей такое же палеомагнитное направление, как и DRM. Дальнейшие процессы окисления и формирования «поздней» CRM, как отмечено выше, могли продолжаться достаточно длительное время.

Если обратиться к геологической истории и к глубинным процессам в тектоносфере региона (см. например [Gordienko et al., 2012]), то начиная с перми эта территория подвергалась воздействию глубинных процессов тектономагматической активизации. Происходили локальные магматические внедрения в нижнюю и среднюю часть коры с образованием магматических куполов на глубинах порядка 5–10 км, над которыми располагались гидротермальные системы. Активизация флюидных процессов способствовала термальному и химическому преобразованию осадочных толщ и, как результат, образованию вторичных минералов железа – носителей ЕОН, с которыми связана вторичная «пермская» компонента намагниченности. Такая последовательность перемагничивания согласуется с термальной историей нижнепалеозойских пород Подолии, описываемой в работе [Środoń et al., 2013]. Здесь авторы пришли к выводу, что отложения силура – нижнего девона при захоронении подвергались диагенезу с максимальными температурами до 200 °С (были подняты с глубины 5–10 км до поверхности между 300 и 100 млн лет назад, в предположении о



**Рис. 5.** Положение ВЕП в силуре – нижнем девоне: а – по данным [Lubnina et al., 2007]; б – по материалам данной публикации (обозначения серий – см. подпись к рис. 2); в – в соответствии с [Torsvik et al., 2012].

Цифрами приведен возраст в млн лет назад. Полюс Эйлера  $\Phi=34^{\circ}\text{S}$ ,  $\Lambda=247^{\circ}\text{E}$  рассчитан по палеомагнитным полюсам YS и DD (в соответствии с таблицей).

**Fig. 5.** Position of the East European platform in the Silurian-Devonian according to data from [Lubnina et al., 2007] (a), this article (series are shown as in Fig. 2) (b), and [Torsvik et al., 2012] (v).

Ages in Ma. Euler pole coordinates ( $\Phi=34^{\circ}\text{S}$ ,  $\Lambda=247^{\circ}\text{E}$ ) are calculated by paleomagnetic poles YS and DD (according to the table).

возможном диапазоне геотермальных градиентов от 40 до 20 °C/км). При этом возраст максимальных палеотемператур относится к 300 млн лет назад, что хорошо согласуется с положением наших «пермских» полюсов вблизи фрагмента ТКМП этого же возраста.

Следует отметить, что полюсы на «пермской» части ТКМП несколько смещены к востоку от референтной кривой и такая же тенденция прослеживается по более ранним определениям на Подолии [Smethurst, Khramov, 1992; Lubnina et al., 2007], которые также смещены к востоку относительно референтной кривой. В работе [Yuan et al., 2011] по трахитовому дайковому комплексу в западной части Украинского щита (возраст 282 млн лет) был определен пермский полюс ( $\Phi=49.4^{\circ}\text{S}$ ,  $\Lambda=0.3^{\circ}\text{E}$ ), что близко к нашим полюсам перематрирования.

Таким образом, у нас есть достаточно оснований утверждать, что выделенная ChRM-компонента является первичной, и на основе этого можно выполнить палеотектонические реконструкции с учетом новых данных.

Как следует из анализа среднепалеозойского фрагмента ТКМП, широтное положение ВЕП в среднепалеозойское время было относительно стабильным (рис. 5). В раннем силуре ВЕП перемещалась с южных широт к экватору, к началу девона дрейфовала в приэкваториальные широты Южного полушария и находилась вблизи экватора до конца карбона (рис. 5, в).

Согласно [Lubnina et al., 2007], дрейф ВЕП в силурийское – раннедевонское время имел несколько иной характер: с начала лланвиерна происходило перемещение из умеренных широт Южного полушария в север-

ном направлении с одновременным разворотом против часовой стрелки, в венлоке – лудлове ВЕП находилась в тропических широтах, а в раннем девоне переместилась в приэкваториальные широты Южного полушария. Это движение в течение силура – раннего девона можно представить как поворот на  $30^\circ$  против часовой стрелки вокруг полюса Эйлера с координатами  $\Phi = 82^\circ\text{S}$ ,  $\Lambda = 27^\circ\text{E}$  (рис. 5, а).

Согласно нашим результатам, в лудлове ВЕП располагалась в приэкваториальных широтах Южного полушария и перемещалась к северу в экваториальные широты Южного полушария в пржидольское время. Далее характер дрейфа изменяется – происходит перемещение уже в южном направлении, и в лохковское время ее положение стабилизируется в приэкваториальных широтах Южного полушария (рис. 5, б). Характер дрейфа платформы можно описать поворотом против часовой стрелки на  $16^\circ$  вокруг полюса Эйлера с координатами  $\Phi=34^\circ\text{S}$ ,  $\Lambda=247^\circ\text{E}$ . Скорость широтного перемещения (минимальная, поскольку долготное перемещение остается неизвестным) составляла не менее 3 см/год, что близко к оценкам, которые можно получить по данным [Torsvik et al., 2012].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Стратотипические разрезы среднего палеозоя юго-запада Украины (Подолія, долина р. Днестр) являются палеомагнитно-информативными для выполнения палеотектонических реконструкций ВЕП в палеозое.

В силурийских – нижнедевонских сероцветных и красноцветных осадочных толщах Подолії, помимо вязкой, выделяются две компоненты ЕОН. Первая выделяется на большинстве образцов при Н- и Т-чистках, имеет юг-юго-западное склонение и отрицательное наклонение. Соответствующий ей палеомагнитный полюс ложится на пермский сегмент ТКМП для Балтики / стабильной Европы [Torsvik et al., 2012].

Другая, выделяемая как характеристическая, компонента намагниченности (ChRM) в некоторых образцах красноцветов (при температурной чистке в диапазоне деблокирующих температур  $590\text{--}690^\circ\text{C}$ ) и в отдельных образцах сероцветов (в переменных полях  $30\text{--}70$  мТл либо в диапазоне деблокирующих температур  $300\text{--}460^\circ\text{C}$ ) имеет юго-западное склонение и положительное наклонение.

2. В сероцветных породах первая из компонент, указывающая на «пермское» направление, обусловлена аутигенным магнетитом, образовавшимся в резуль-

тате перемагничивания осадочных толщ в ходе тектонических событий (вероятно глубинных процессов тектономагматической активизации), которые сопровождали позднепалеозойскую – раннемезозойскую эволюцию окраины ВЕП. В то же время в красноцветных породах эта компонента обусловлена образованием аутигенного мелкозернистого гематита, с которым связано формирование «поздней» CRM.

Другую (ChRM) компоненту мы связываем с присутствием в сероцветных породах детритовых зерен магнетита. В то же время в красноцветах ее носителем являются зерна детритового гематита, хотя здесь мы не исключаем также «раннюю» химическую намагниченность, сформировавшуюся в это же время (в геологическом масштабе) и имеющую такое же палеомагнитное направление. Эта компонента имеет все признаки первичной, поскольку: а) ее носителем являются аллотигенные зерна, то есть природа намагниченности, вероятнее всего, седиментационная; об этом же косвенно свидетельствуют результаты анализа АМВ, типичной для осадочных структур; б) она выделена на породах разного фациального состава с разными носителями намагниченности; в) ее направление совпадает с силурийскими / нижнедевонскими полюсами палеозойского сегмента ТКМП для Балтики / стабильной Европы.

3. Анализ моделей дрейфа ВЕП в среднем палеозое указывает на соответствие наших результатов кинематической модели Балтики / стабильной Европы по [Torsvik et al., 2012]. Согласно нашим результатам, в лудлове ВЕП располагалась в приэкваториальных широтах Южного полушария, в пржидольское время перемещалась к северу в экваториальные широты Южного полушария. Далее характер дрейфа изменяется – происходит перемещение уже в южном направлении, и в лохковское время положение ВЕП стабилизируется в приэкваториальных широтах Южного полушария. Характер дрейфа платформы можно описать поворотом против часовой стрелки на  $16^\circ$  вокруг полюса Эйлера, с координатами  $\Phi=34^\circ\text{S}$ ,  $\Lambda=247^\circ\text{E}$ . Скорость широтного перемещения составляла не менее 3 см/год.

4. Осадочные толщи палеозоя Подолії являются перспективным объектом для проведения более детальных палеомагнитных исследований. Широкое распространение и обнаженность этих толщ на территории Юго-Западной Украины в возрастном диапазоне от венда до среднего девона позволяют рассчитывать, что соответствующий фрагмент ТКМП для Балтики / стабильной Европы может быть уточнен и детализирован.

## 7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bakhmutov V., Teisseyre-Jeleńska M., Kądziałko-Hofmokr M., Konstantinenko L., Poliachenko I., 2012. Paleomagnetic study of Lower Devonian gray-colored deposits of Podolia. *Geofizicheskiy Zhurnal* 34 (6), 57–67 (in Russian) [Бакхмутов В.,

- Тейсер-Еленська М., Кадзялко-Хофмюль М., Константиненко Л., Поляченко Е. Палеомагнитные исследования нижнедевонских сероцветных отложений Подолии // *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34. № 6. С. 57–67].
- Butler R.F., 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Boston: Blackwell Scientific Publications, 319 p.
- Chadima M., Hroudá F., 2006. Remasoft 3.0 a user friendly paleomagnetic data browser and analyser. *Travaux Géophysiques* 27, 20–21.
- Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodniaya O.V., Kovachikova S., Logvinov I.M., Tarasov V.N., Usenko O.V., 2012. Volyn'-Podilla Plate: Geophysics, Deep-seated Processes. Publishing house of Naukova Dumka, Kiev, 198 p. (in Russian) [Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Вольно-Подольская плита: геофизика, глубинные процессы. Киев: Наукова Думка, 2012. 198 с].
- Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M., 2012. *The Geological Time Scale 2012*. Elsevier, Boston, USA, 2-volumes set, 1176 p.
- Jeleńska M., Bakhmutov V., Konstantinenko L., 2005. Paleomagnetic and rock magnetic data from the Silurian succession of the Dniester basin, Ukraine. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 149 (3–4), 307–320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2004.10.005>.
- Jeleńska M., Kędziałko-Hofmök M., Bakhmutov V., Poliachenko I., Ziółkowski P., 2010. Identification of magnetic carriers of original and secondary NRM components recorded in Devonian sediments from Podolia, SW Ukraine. *Geophysical Journal* 32 (4), 59–60.
- Jelinek V., 1977. The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility and its application. *Geofyzika Brno*, 5–88.
- Kirschvink J.L., 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* 62, 699–718. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365246X.1980.tb02601.x>.
- Kodama K.P., 2012. *Paleomagnetism of Sedimentary Rocks: Process and Interpretation*. Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Ltd. Publication, 157 p.
- Khranov A.N. (Ed.), 1982. *Paleomagnetology*. Nedra, Leningrad, 312 p. (in Russian) [Палеомагнитология / Ред. А.Н. Храмов. Л.: Недра, 1982. 312 с.].
- Lubnina N.V., 2009. East-European Craton from Neoproterozoic to Paleozoic by Palaeomagnetic Data. Manuscript of Dissertation for a scientific degree of Doctor of Geology-Mineralogy Sciences. Moscow State University, Moscow, 40 p. (in Russian) [Лубнина Н.В. Восточно-Европейский кратон от неопрозоика до палеозоя по палеомагнитным данным: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГУ, 2009. 40 с.].
- Lubnina N.V., Iosifidi A.G., Khranov A.N., Popov V.V., Lewandowski M., 2007. Paleomagnetism of the Silurian and Devonian sedimentary formations of Podolia, Ukraine. In: *Paleomagnetism of the Northern Eurasia sedimentary basins*. VNIIGRI Publishing House, S.-Petersburg, p. 105–125 (in Russian) [Лубнина Н.В., Иосифиди А.Г., Храмов А.Н., Попов В.В., Левандовский М. Палеомагнитные исследования силурийских и девонских отложений Подолии // Палеомагнетизм осадочных бассейнов Северной Евразии. СПб.: Издательство ВНИГРИ, 2007. С. 105–125].
- Nikiforova O.I., Predtechenskiy N.N., 1972. Stratigraphy. In: *Silurian and Lower Devonian reference section of Podolia*. Publishing House Nauka, Leningrad, p. 26–127 (in Russian) [Никифорова О.И., Предтеченский Н.Н. Стратиграфия // Опорный разрез силура и нижнего девона Подолии. Л.: Наука, 1972. С. 26–127].
- Pecherskiy D.M., Didenko A.N., 1995. Paleozoic ocean: petromagnetic and paleomagnetic information about its lithosphere. UIPE RAS, Moscow, 294 p. (in Russian) [Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 294 с.].
- Poliachenko I., Bakhmutov V., Konstantinenko L., Teisseyre-Jeleńska M., Kędziałko-Hofmök M., Scarboviychuk T., Yakukhno V., 2014. New results of paleomagnetic studies of red-colored Silurian of Podolia. *Geofizicheskiy Zhurnal* 36 (3), 34–47 (in Russian) [Поляченко Е., Бахмутов В., Константиненко Л., Тейсер-Еленська М., Кадзялко-Хофмюль М., Скарбовийчук Т., Якухно В. Новые результаты палеомагнитных исследований красноцветных силурийских отложений Подолии // *Геофизический журнал*. 2014. Т. 36. № 3. С. 34–47].
- Smethurst M.A., Khranov A.N., 1992. A new Devonian palaeomagnetic pole for the Russian platform and Baltica, and related apparent polar wander. *Geophysics Journal International* 108 (1), 179–192. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00848.x>.
- Środoń J., Paszkowski M., Drygant D., Anczkiewicz A., Banaś M., 2013. Thermal history of Lower Paleozoic rocks on the Peri-Tornquist Margin of the East European Craton (Podolia, Ukraine) inferred from combined XRD, K-Ar, and AFT data. *Clays and Clay Minerals* 61, 107–132. <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610209>.
- Torsvik T.H., Smethurst M.A., Meert J.G., Van der Voo R., McKerrow W.S., Sturt B.A., Brasier M.D., Walderhaug H.J., 1996. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic – a tale of Baltica and Laurentia. *Earth Science Reviews* 40 (3), 229–258. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/0012-8252\(96\)00008-6](http://dx.doi.org/doi:10.1016/0012-8252(96)00008-6).
- Torsvik T.H., Smethurst M.A., Van der Voo R., Trench A., Abrahamsen N., Halvorsen E., 1992. Baltica – synopsis of Vendian-Permian palaeomagnetic data and their palaeotectonic implications. *Earth Science Reviews* 33 (2), 133–152. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252\(92\)90023-M](http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(92)90023-M).
- Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., McNicoll C., Steinberger B., Doubrovine P., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks L.R.M., 2012. Phanerozoic polar wander, paleogeography and dynamics. *Earth Sciences Review* 114 (3), 325–368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.

Tsegelnyuk P.D., Gritsenko V.P., Konstantinienko L.I., Ishchenko A.A., Abushik A.F., Bogoyavlenskaya O.V., Drygant D.M., Zaika-Novatsky V.S., Kadlets N.M., Kiselev, G.N., Sytova V.A., 1983. The Silurian of Podolia, the Guide to the Excursion. Publishing House of Naukova Dumka, Kiev, 224 p. (in Russian) [Цегельнюк П.Д., Гриценко В.П., Константиненко Л.И., Ищенко А.А., Абушик А.Ф., Богоявленская О.В., Дрыгант Д.М., Заика-Новацкий В.С., Кадлец Н.М., Киселев Г.Н., Сытова В.А. Силур Подолии: Путеводитель экскурсии. Киев: Наукова Думка, 1983. 224 с.].

Yuan K., Van der Voo R., Bazhenov M.L., Bakhmutov V., Alekhin V., Hendriks B.W.H., 2011. Permian and Triassic paleolatitudes of the Ukrainian shield with implications for Pangea reconstructions. *Geophysical Journal International* 184 (2), 595–610. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04889.x>.



**Бахмутов Владимир Георгиевич**, докт. геол. наук, зав. отделом петромагнетизма и морской геофизики  
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины  
03680, Киев-142, пр. Палладина, 32, Украина  
✉ e-mail: [bakhmutovvg@gmail.com](mailto:bakhmutovvg@gmail.com)

**Bakhmutov, Vladimir G.**, Doctor of geology, Head of petromagnetism and marine geology sector  
S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine  
32 Palladin av., Kiev-142 03680, Ukraine  
✉ e-mail: [bakhmutovvg@gmail.com](mailto:bakhmutovvg@gmail.com)



**Поляченко Евгений Брониславович**, м.н.с.  
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины  
03680, Киев-142, пр. Палладина, 32, Украина  
e-mail: [lithos@bk.ru](mailto:lithos@bk.ru)

**Poliachenko, Ievgen B.**, Junior Researcher  
S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine  
32 Palladin av., Kiev-142 03680, Ukraine  
e-mail: [lithos@bk.ru](mailto:lithos@bk.ru)