

## Геофизические аспекты строения и генезиса Ильинецкой структуры: импакт или вулкан?

© В. А. Ентин<sup>1</sup>, М. И. Орлюк<sup>2</sup>, С. И. Гуськов<sup>1</sup>,  
А. В. Федоров<sup>1</sup>, В. Н. Павлюк<sup>1</sup>, В. В. Друкаренко<sup>2</sup>, 2013

<sup>1</sup>СГРГП "Північгеологія", Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 29 февраля 2012 г.

*Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым*

Розглянуто геофізичні аспекти будови та генезису Іллінецької структури. Запропоновано нову імпактно-вулканічну концепцію утворення та становлення Іллінецької структури на підставі аналізу гравітаційного та магнітного полів, експериментального вивчення густини та намагніченості ядра двох свердловин у сукупності з геохронологічними даними, її гравітаційною та магнітною моделями. Згідно з результатами комплексних геолого-геофізичних досліджень, у пізньому ордовіку відбулась ударно-метеоритна подія з утворенням класичної імпактної структури, що спровокувало в ранньому девоні в епіцентрі удару космічного тіла розвиток еруптивного вулканічного апарату.

Geophysical aspects of the structure and genesis of the Illinets structure have been considered in the article. New impact-volcanic concept of formation and becoming the Illinets structure have been proposed on the base of analysis of gravity and magnetic fields, experimental studies of density and magnetization of core from two bore holes together with geochronologic data, its gravity and magnetic models. In accordance with complex geological-geophysical studies in the Late Ordovician impact-meteoritic effect occurred with production of classical impact structure, which provoked, in the early Devonian in the epicenter of the blow of the cosmic body, the development of eruptive volcanic apparatus.

**Введение.** Ильинецкая структура была выявлена и оконтурена по данным гравиразведки [Ушакова, Цымбал, 1957] и магниторазведки [Плохотниченко и др., 1968] среднего масштаба в бассейне р. Соб, левого притока р. Южный Буг, на севере Винницкой области, между селами Иваньки, Луговая на юге и Вернянка, Войтовцы на севере. Как объект-феномен [Ентин, 2010], не имеющий по своим геолого-геофизическим характеристикам и параметрам аналогов на Украине, она приурочена к северо-западной части Бугского блока Украинского щита (УЩ) — области восточного экзоконтакта Немировского глубинного разлома северо-восточного простирания и субширотного разлома, ограничивающего на севере источник Гайсинской региональной магнитной аномалии. Впервые экзотические породы вулканогенного облика

в этом районе были описаны К. И. Теофилактовым еще в 1861 г. Генезис необычных по составу и облику пород, обнаруженных здесь на первоначальных этапах изучения структуры, связывался с вулканическим аппаратом девонского возраста [Плохотниченко и др., 1968; Виноградов, Палий, 1973; Гинтов и др., 1975; Михайлова и др., 1978], а позже — со структурой ударно-метеоритной природы [Gurov et al., 1998; Гуров, Гожик, 2006]. При этом обе точки зрения базировались на результатах изучения каменного материала, фактически отобранного из одних и тех же обнажений, и ядра пробуренных здесь в прошлые годы нескольких десятков скважин самого различного предназначения и информативности. Большинство скважин, пройденных непосредственно в пределах структуры, не достигли кристаллического цоколя, за-

виснув в толще аллогенной брекчии гетерогенного состава. В связи с этим, несмотря на, казалось бы, достаточное количество скважин, фактически остались недоизученными морфология поверхности цокольного основания структуры, внутренние структурно-тектонические особенности и вещественный состав подстилающих пород. Результаты же проведенных здесь гравиразведки и магниторазведки были использованы совершенно недостаточно. Отмечалось лишь, что Ильинецкая структура, благодаря своей, как это считалось, чашеобразной форме (на уровне поверхности кристаллического фундамента), находит отражение в поле силы тяжести в виде субизометричного контрастного минимума, центральная часть которого совпадает с магнитной аномалией отрицательного знака. Наличие подобной формы контрастно выраженных минимумов силы тяжести считается главным и обязательным геофизическим признаком структур ударно-метеоритной природы, хотя они вполне свойственны и объектам магматического генезиса. Тем не менее именно с учетом этого признака в свое время на УЩ были установлены и в дальнейшем описаны как астроблемы Белиловская, Болтышская, Ротмистровская, Оболонская и Зеленогайская структуры неясного генезиса. Природа же магнитной аномалии отрицательного знака объяснялась (без проведения количественных расчетов) исключительно магнитными свойствами измененных пород кристаллического фундамента, получивших в результате ударно-теплового воздействия обратную (по отношению к современному магнитному полю Земли) намагниченность.

**Гравитационное и магнитное поля района исследований.** Ильинецкая структура расположена в области субширотного, довольно узкого минимума аномального магнитного поля интенсивностью около  $- (300—400)$  нТл, который в свою очередь приурочен к максимальному градиенту его региональной компоненты [Крутиховская и др., 1982; Нечаева та ін., 2002]. Минимум аномального магнитного поля имеет сложную природу, обусловленную, по видимому, наложением двух факторов: минимумом источника Гайсинской региональной магнитной аномалии, северные контакты которого имеют южное падение [Орлюк, 2000] и обратномагнитными породами верхней части коры [Михайлова и др., 1978]. В связи с проведением в последние годы работ по доизучению территории листа М-35-XXX в масштабе 1 : 200 000 [Деркач, 2005], появилась новая возможность получить дополнительную, бо-

лее полную геолого-геофизическую информацию относительно некоторых аспектов строения Ильинецкой структуры уже с учетом анализа и интерпретации вновь полученных материалов по ее центральной части (магниторазведка по сети  $50 \times 50$  м и бурение трех скважин). Естественно, при этом были отчасти пересмотрены и переинтерпретированы имевшиеся геолого-геофизические данные прошлых исследований.

Представления о форме и размерах Ильинецкой структуры получены в основном по результатам анализа особенностей поля аномалий силы тяжести, где она проявляется в виде гравитационного минимума амплитудой  $6,5$  мГал овалоподобной формы ( $7 \times 6$  км), длинная ось которого вытянута в северо-западном направлении (рис. 1). Ильинецкая структура, имеющая в поле аномалий Буге довольно простой вид, на карте горизонтального градиента силы тяжести проявляет отчетливо выраженные черты концентрически-зонального строения в виде 2—5 рядов концентрично расположенных цепочек или небольших фрагментов зон больших значений ( $20—40$  Э) этого параметра (рис. 2). Юго-восточный и южный фланги Ильинецкого минимума характеризуются 4—5 ступенчатым спадом напряженности гравитационного поля, а в северо-западном направлении подобный спад происходит гораздо быстрее, всего лишь по двум ступеням. В относительно полном виде (как единый локализованный минимум) проявляется лишь центральная часть ( $2 \times 1$  км) Ильинецкой аномалии, хотя и внутри нее на общем пониженном фоне напряженности фиксируются несколько локальных минимумов более высокого порядка, объединяемых в общую, разомкнутую на юге субкольцевую зону (рис. 1, вставка).

Отмеченные особенности проявления Ильинецкой структуры в поле аномалий силы тяжести свидетельствуют об определенной асимметричности ее строения и внутренней плотностной неоднородности.

Магнитное поле в контуре общего гравитационного минимума характеризуется относительно спокойным отрицательным фоном  $- (400—600)$  нТл. Внешние границы Ильинецкой структуры на этом фоне однозначно не проявляются, а лишь фрагментарно могут быть установлены на южном и частично на юго-восточном флангах по положению обрамляющих ее здесь цепочек малоамплитудных магнитных максимумов небольшой протяженности (рис. 3). Уже отмечалось, что по имевшимся представлени-

ям магнитное поле Ильинецкой структуры характеризовалось наличием лишь одного локализованного минимума, приуроченного к эпицентру отрицательной гравитационной аномалии. Однако, по нашим данным внутренняя структура магнитного поля, как и гравитационного, в этой центральной области Ильинецкой аномалии имеет гораздо более сложный вид. Здесь отмечается целая группа локальных минимумов  $\Delta T_a$  различной формы, простирания и амплитуды, приуроченная к отмеченной выше внутренней субкольцевой зоне локальных минимумов силы тяжести. Среди этой группы локальных магнитных минимумов выделяются два сближенных наиболее интенсивных экстремумов амплитудой – 1000 и – 700 нТл, образующих фактически единую двугорбую аномалию (350 × 150 м) отрицательного знака северо-восточного простирания, которая совпадает в плане с таким же локальным минимумом поля силы тяжести. Именно эта область геофизических полей чаще всего принимается за эпицентр Ильинецкой структуры и наиболее полно и подробно изучается геологическими работами. Магнитный минимум изучаемой структуры уникален по отношению к магнитным полям, зафиксированным для известных в Украине и за рубежом структур подобного типа. Например, в Канаде подобные структуры при существенно больших горизонтальных размерах характеризуются минимумами магнитного поля интенсивностью – (100—250) нТл, и только крупнейшие из них Clearwater West (36 км), Clearwater East (26 км) — аномалиями до – 500 нТл [Scott et al., 1995].

**Магнитные и плотностные свойства пород.** Для выяснения природы магнитного минимума в его пределах [Плохотниченко и др., 1968] были пробурены три скважины глубиной более 300 м (№ 2100, 2102, 2103), не достигнув на этой глубине кристаллического цоколя структуры. Результаты бурения фактически объяснили лишь природу наблюдаемого здесь локального гравитационного минимума. Природа магнитного минимума, предположительно связанная с особыми магнитными свойствами измененных пород кристаллического фундамента, осталась не выясненной, хотя даже качественный анализ высоких градиентов наблюдаемого здесь магнитного поля позволял предположить неглубокое залегание источника аномалии. В связи с этим было принято решение о дублировании бурения в эпицентрах отмеченных локальных минимумов  $\Delta T_a$ . Были пробурены две относительно неглубокие сква-

жины (№ 8Д, 9Д), вскрывшие в основном разнородные образования аллогенной брекчии, из которых на изучение плотностных и магнитных свойств были отобраны 22 образца. В результате для всех образцов в лабораториях ПДРГП "Північгеологія" и Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины были определены значения их плотности, магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности. Дополнительно к этим параметрам в лаборатории ИГФ НАНУ были измерены зенитные углы вектора остаточной намагниченности ( $I_r$ ) по отношению к положению "верх—низ" образца. Азимутальное положение этого параметра не определялось, так как сам керн не был ориентирован в пространстве.

Палеомагнитные свойства пород Ильинецкой структуры ранее уже изучались на образцах, отобранных из двух обнажений, расположенных в южной части структуры и представленных туфоконгломератами (туфобрекчией) и эффузивами (трахидацит?, тагамит?) [Михайлова и др., 1978; Pesonen et al., 2004]. В результате было установлено, что естественные магнитные параметры этих пород изменяются в довольно широких пределах, при этом остаточная намагниченность эффузивов (?) на порядок больше по сравнению с туфобрекчией. Различаются эти породы и по углу наклона результирующего вектора намагничивания (у эффузивов – 23°, у туфобрекчий – 44°). По данным оптического изучения образцов основным носителем магнитных свойств (ферромагнетиком) в них является тонкодисперсный титаномагнетит с точкой Кюри 550 °С.

Более детальная магнитная и палеомагнитная характеристика пород исследуемой структуры приведена в работе [Pesonen et al., 2004]. В ней показан сложный характер намагниченности исследуемых образцов, обусловленный наличием вязкой компоненты, связанной с современным магнитным полем Земли, и остаточной намагниченности термической и термохимической природы, возникшей во время постударного остывания, а также под влиянием дальнейшей гидротермальной активности. Подчеркнем, что в работе [Михайлова и др., 1978] полученные данные характеризуют магнитные свойства пород, находящихся за пределами минимума  $\Delta T_a$  и которые, по-видимому, обуславливают общий пониженный уровень напряженности магнитного поля на всей площади Ильинецкой структуры и за ее пределами. Тем не менее, анализируя полученные результаты, авторы пришли к заключению, что "палеомаг-

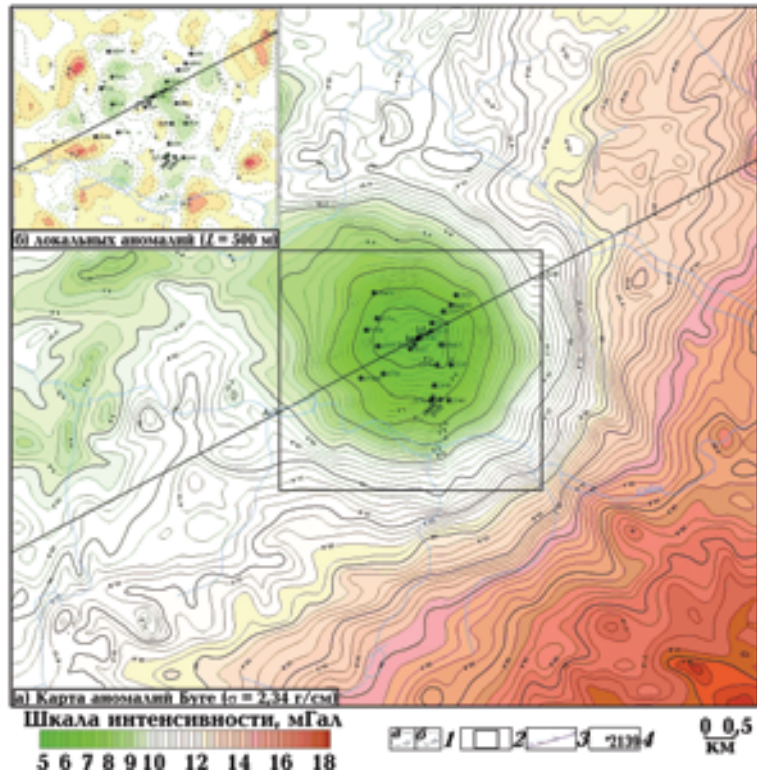


Рис. 1. Карта гравитационных аномалий: 1 — изоаномалы, мГал (а — поля  $g_a$  (Буге), б — поля  $\Delta g_a$ ); 2 — контур карты-врезки локальных аномалий ( $\delta g_a$ ); 3 — линия геолого-геофизического разреза; 4 — картировочно-структурные скважины и их номера.

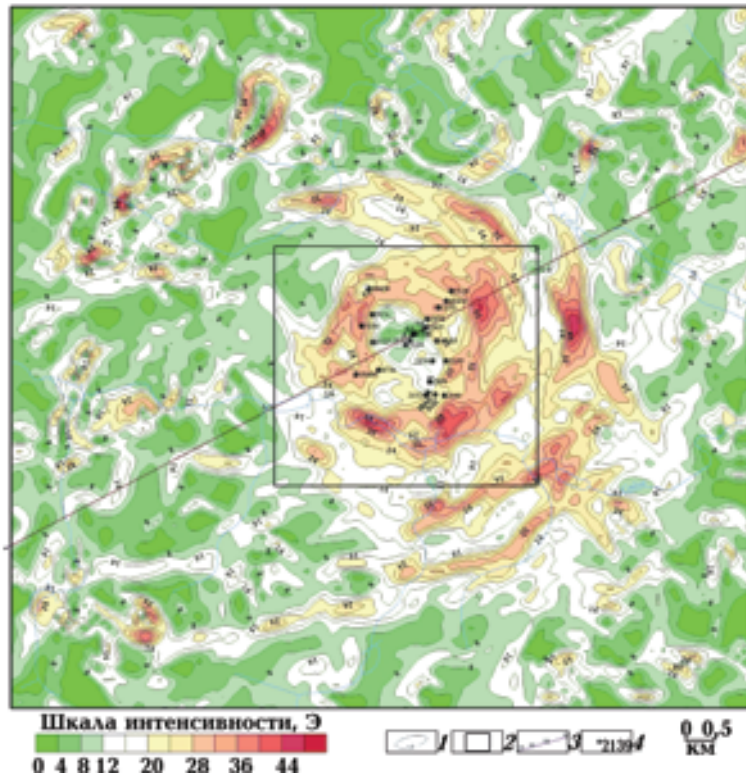


Рис. 2. Карта модуля горизонтального градиента гравитационного поля: 1 — изолинии  $W_{x_s}$ , Э. Остальные условные обозначения см. на рис. 1.



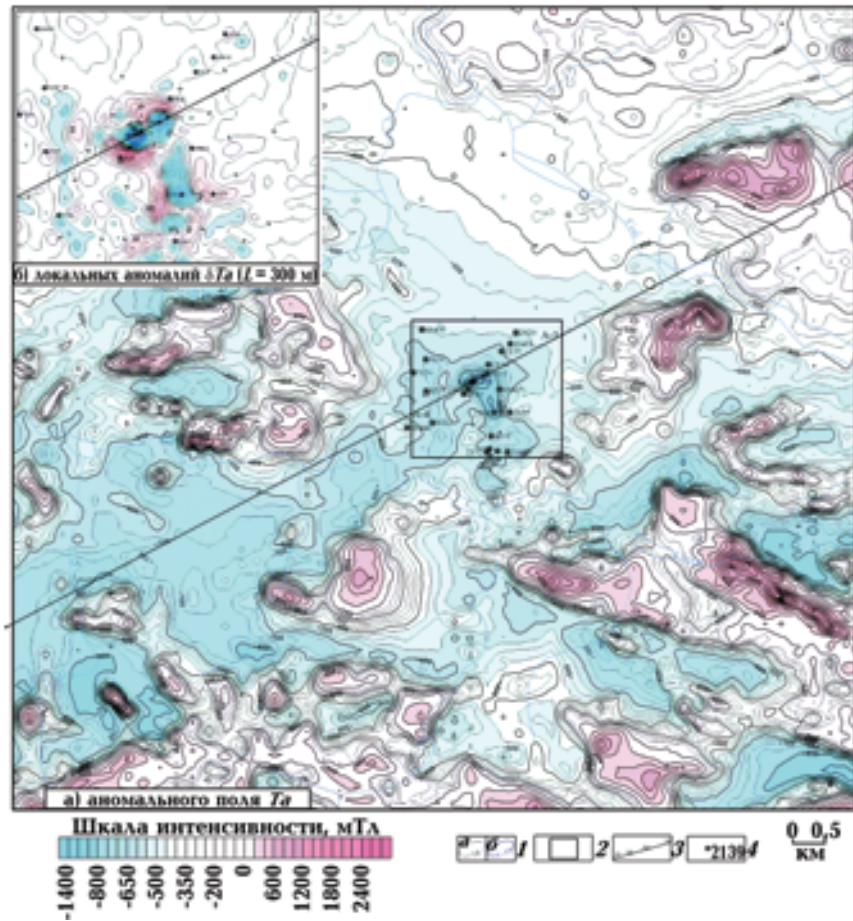


Рис. 3. Карта аномалий магнитного поля: 1 — изодинамы магнитного поля, нТл (а — аномального поля  $\Delta T_a$ , б — локальных аномалий  $\delta T_a$  ( $L = 300$  м)). Остальные условные обозначения см. на рис. 1.

нитные данные убедительно показывают, что образование эффузивов и туфобрекчий не являлось одновременным (синхронным), а так как это неперемное условие гипотезы метеоритного происхождения, то, следовательно, гипотеза их магматического генезиса предпочтительней".

Результаты проведенного нами изучения магнитных и плотностных свойств образцов керн на скважин, пробуренных в эпицентре минимумов  $\Delta T_a$ , не противоречат вышеприведенным данным, существенно дополняя их в части геолого-геофизической природы наблюдаемой в центре Ильинецкой структуры интенсивной магнитной аномалии отрицательного знака. Совместный анализ прямых данных бурения и физических свойств изученных образцов керн на скважин (таблица) позволяет сделать несколько весьма определенных выводов.

Самое главное, что следует из анализа магнитных свойств изученных образцов — их очень высокая, как для образований подобного рода, общая намагниченность ( $I_r = 23,6$  А/м,  $I_i = 0,3$  А/м для скв. 8Д и  $I_r = 3,0$  А/м,  $I_i = 0,3$  А/м для скв. 9Д), обусловленная в основном остаточной составляющей, которая по абсолютной величине на порядок ( $Q = 9,8$ ) больше индуктивной (см. таблицу). Определяющим фактором, объясняющим отрицательный знак наблюдаемой магнитной аномалии, служит обратная (по отношению к современному магнитному полю Земли) направленность вектора остаточной намагниченности (отрицательные значения зенитного угла в пределах  $- (40-60^\circ)$  у образцов из средней части разреза обеих скважин (преимущественно толща аргиллитов)). Намагниченность отрицательно намагниченных пород больше по отношению к намагниченности разреза в целом

( $I_r = 55$  А/м,  $I_i = 0,28$  А/м по скв. 8Д и  $I_r = 4$  А/м,  $I_i = 0,37$  А/м по скв. 9Д). Вмещающие же их туфобрекчии характеризуются углами наклона вектора остаточной намагниченности, более близкими к вектору современного намагничивающего поля Земли. По данным анализа протолочных проб и по описаниям аншлифов носителями магнитных свойств являются ферромагнитные минералы — магнетит, маггемит, магнитный пирит, обильно, но не равномерно распределенные по всей этой части разреза. Свидетельством такого характера распределения ферромагнетиков служит большой разброс в значениях намагниченности, определенных на вырезанных из керна скважин лабораторных кубиках и цилиндрах (см. таблицу). Обращает на себя внимание разный состав и дисперсность магнитных минералов по разрезу скважины. В частности, исследование аншлифов образцов нижней части разреза показало, что в образцах № 8/140; 8/134; 8/108; 8/101 магнитная фракция полностью представлена пиритом с размером зерен 5—20 мк. Выше по разрезу (образцы 8/94; 8/70; 8/65) кроме пирита присутствуют более тонкодисперсный магнетит, маггемит, мельдимит или марказит с размерами зерен менее 5 мк (из-за этого часто не поддающиеся диагностике). Для очень высокомагнитного образца № 8/70 тонкодисперсный магнетит наблюдается в виде включений в пирите. Даже на общем "аномальном" фоне магнитных свойств пород разреза скв. 8Д этот образец обладает очень большим значением остаточной намагниченности ( $I_r = 251$  А/м) и, по-видимому, сильной анизотропией, обуславливающей в итоге кажущуюся алогичной отрицательную величину магнитной восприимчивости. В верхней части разреза снова преобладает пирит (образец № 8/41,3) с размерами частиц до 0,1 мм с очень незначительным содержанием магнетита (менее 0,001 %). Такое распределение состава и размеров магнитных минералов в принципе подтверждается термомагнитным анализом, из которого видно наличие устойчивой компоненты намагниченности, связанной с тонкодисперсным магнетитом (рис. 4). Принципиальным в данном случае является тот факт, что смешанная форма минерализации присуща той части разреза, породы которой характеризуются обратным вектором намагниченности, а пиритовая — верхней и нижней частям с более близким к нормальному направлением вектора остаточной намагниченности.

Плотность вскрытых по всему разрезу обра-

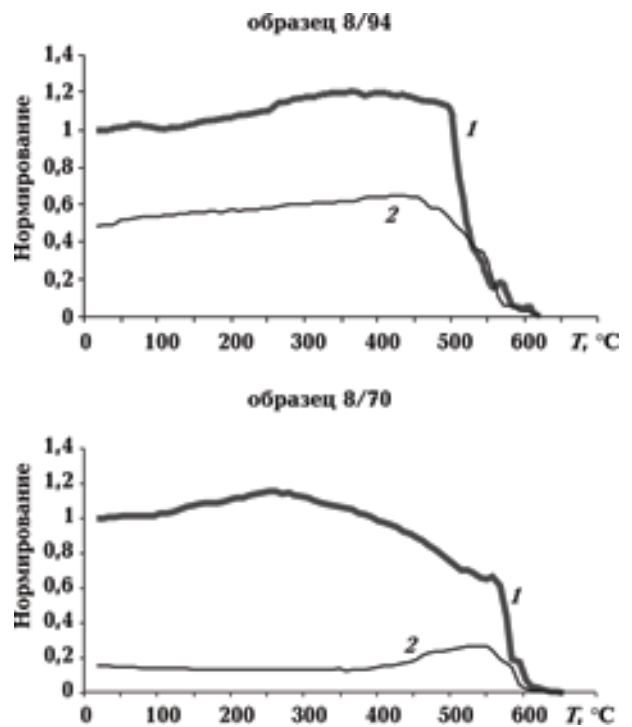


Рис. 4. Термомагнитный анализ образцов пород из скв. 8Д: 1 — нагрев, 2 — охлаждение.

зований весьма низкая и варьирует в широком диапазоне, изменяясь как по вертикали (от 1,82 до 2,33 г/см<sup>3</sup>), так и по горизонтали (среднее значение плотности по разрезу скв. 8Д составляет 2,20 г/см<sup>3</sup>, а скв. 9Д — 2,05 г/см<sup>3</sup>), что свидетельствует о значительной общей петроплотностной гетерогенности толщи аллогенных брекчий (см. таблицу).

Таким образом, комплексный качественный анализ особенностей внутренней структуры Ильинецкого гравитационного минимума, прямых данных бурения и петроплотностных определений позволяет с достаточной надежностью предположить несколько основных факторов его существования.

Так, становится очевидным, что рельеф дна центральной овалоподобной части Ильинецкой структуры в основном обуславливается наличием здесь, на уровне современного среза кристаллического фундамента, депрессии воронкообразной формы, заполненной преимущественно брекчированными осадочными породами (туфогенной брекчией?, зювитами?) низкой плотности (1,9—2,3 г/см<sup>3</sup>). Детальные особенности рельефа поверхности дна депрессии, учитывая сложномозаичный характер поля локальных аномалий силы тяжести (см. рис. 1, 2) и данные бурения, определяются приблизительно-

Результаты определения физических свойств керна скважин № 8Д, 9Д на Ильинцевской структуре

Номер образца	$Q = I_r / I_i$				$I_r, A/M$	$I_i, A/M$	Угол $\gamma$ , град		Плотность, г/см <sup>3</sup>			Порода		
	ПДРГП «Північне-лопя»	ИГФ НАНУ		ИГФ НАНУ			Принятое	ПДРГП «Північне-лопя»	ИГФ НАНУ	ИГФ НАНУ	Принятое			
		ЛАМ-24	ЖР-4										ЛАМ-24	ЖР-4
8/25	1,23	1,05	0,96	1,08	0,020	0,02	0,02	56	54	55	2,00	2,05	2,02	Брекчия аллогенная, основная масса землстая с включениями граптоидов и мигматитов
8/41	1,48	38	13,8	17,76	0,022	1,3	1,49	-59	-62	-60	2,23	2,26	2,24	Брекчия аллогенная в середине переходит в глинистый серый сланец. Присутствует пирит, изредка магнетит
8/47	8,37	5,69	3,73	5,93	4,551	5,3	3,4	-52	-47	-50	2,25	2,23	2,24	Аргиллит, сланец глинистый с текстурой брекчирования
8/55	4,38	5,66	1,77	3,94	0,271	0,3	0,2	-53	-54	-54	2,16	2,16	2,16	Брекчия аллогенная с ксенолитами гранита, брекчиевидного сланца
8/65	55,42	28,2	19	61,41	0,375	0,45	0,44	-65	-53	-61	2,22	2,23	2,22	Аргиллит серый брекчированный. Присутствует пирит с вкраплениями магнетита
8/70	13,2	682	1542	745,73	30,040	361	362	-11,5	-16	-14	2,23	2,15	2,19	Аргиллит серый брекчированный. Присутствует магнезит, марказит
8/79	4,53	4,84	0,04	3,14	6,000	8,2	0,08	56	48	52	2,27	2,25	2,26	Аргиллит серый брекчированный
8/94	7,31	164,3	—	85,8	2,473	35,9	—	11,7	—	12	2,21	2,15	2,18	Аргиллит серый брекчированный. Присутствует магнезит
8/97	4,62	3,83	2,88	3,78	2,000	2,6	1,59	-46	-41	-44	2,14	2,13	2,14	Аргиллит серый брекчированный
8/101	4,24	23,9	—	18,88	11,082	15,6	—	52	50	51	2,33	2,33	2,33	Тагамет черно-серый стекловидный с очковыми включениями граптоидов. Присутствует пирит

Окончание табл.

8/108	10,8	66 63,2	5,56	36,39	5,35	24,5 23,9	4,2	14,49	0,4	42 43	-22	42	2,04	2,06	2,05	Брекчия, обломки аргиллита брекчированной структуры. Присутствует пирит
8/134	3,24	33,6	4,3	13,71	0,062	0,001	0,06	0,041	0,003	61	65	63	2,25	2,28	2,26	Брекчия импактная аллохтонная с интервалами тагамитов
8/140	102,15	55,15 5044	14,9	57,40	1,408	1,4 1,4	0,88	1,23	0,02	61 60	57	59	2,27	2,27	2,27	Гранит розово-серый какаказированный с участками мильонга. Присутствует пирит
Средневзвешенное		74,97		74,97				23,61						2,20		
9/43	3,16	4,08	2,94	3,39	0,270	0,3	0,3	0,29	0,09	17	41	29	1,85	1,8	1,82	Тагамит черно-серый стекловидный с очковыми включениями гранитоидов
9/50	5,57	6,56	6,66	6,26	0,340	0,4	0,49	0,41	0,07	50	51	50	1,90	1,92	1,91	Брекчия аллохтонная
9/62	7,46	13,1	5,07	8,54	0,540	0,8	0,87	0,74	0,09	57	11	34	2,02	2,06	2,04	Аргиллит серый брекчированный
9/67	9,46	12,2	7,61	9,76	12,600	14	11,4	12,67	1,30	-48	-49	-48	2,20	2,18	2,19	Аргиллит серый брекчированный
9/71	9,5	10,5 12,3	7,9	10,05	5,780	7,5 7,7	5,2	6,19	0,62	-45 -37	18	-41	2,09	2,1	2,10	Аргиллит серый брекчированный
9/90	13,17	17,1 18	9,7	14,49	1,840	2,1 2,1	1,5	1,81	0,12	-51 -53	32	-52	2,13	2,1	2,12	Аргиллит серый брекчированный
9/110	11,74	9,7 9,9	—	10,77	2,830	3,2 3,2	—	3,00	0,28	-68 -48	—	-58	2,15	2,11	2,13	Аргиллит серый брекчированный
9/125	3,52	10,03	3,57	5,71	0,240	0,3	0,56	0,37	0,06	-52	-62	-57	2,13	2,11	2,12	Гранит с расплавленными интервалами брекчий. Прослеживается двухэтапное брекчирование, наличие брекчий брекчированных гранитов
Средневзвешенное		9,79		9,79				3,01						2,05		



но и требуют своего уточнения. Вся периферийная область отмеченной депрессии заполнена преимущественно брекчией кристаллических пород, которая отличается от осадочной более высокими значениями плотности на уровне 2,25—2,45 г/см<sup>3</sup>. Именно этот фактор — наличие аномально глубокой, не характерной для аналогичных структур УЩ депрессии, заполненной образованиями низкой плотности, объясняет локальный минимум в центре Ильинецкой структуры.

Наблюдаемый же на карте аномалий Буге гораздо больший по площади (~ 40 км<sup>2</sup>) Ильинецкий минимум обуславливается, помимо обозначенного выше фактора, еще дополнительным влиянием обширной круговой зоны сильнотрещиноватых катаклазированных кристаллических пород (2,40—2,60 г/см<sup>3</sup>), обрамляющей по периметру всю центральную кратерную часть структуры. Концентрически-зональный рисунок этой области гравитационного поля формируется за счет наложенного гравитирующего эффекта от дополнительного разуплотнения кристаллических пород в тектонических зонах кольцевого заложения.

**Магнитное и гравитационное моделирование.** Накопленный геолого-геофизический материал позволил сделать первые приближения магнитной и гравитационной моделей Ильинецкой структуры. Моделирование выполнялось в 3D и 2,5D вариантах для магнитного поля и 2,5D для гравитационного в интерактивном режиме с использованием программного обеспечения решения прямой задачи магниторазведки и гравиразведки [Завойский, 1978; Справочник ..., 1990]. Сложность построения магнитной модели предопределена очень неоднородным распределением магнитной восприимчивости и намагниченности пород по результатам экспериментальных исследований и трудностью перехода от полученных величин для конкретных образцов к объемным телам в целом. Просчитанная 3D магнитная модель, с заданием глубины залегания пород и приведенных в таблице значений их намагниченности и магнитной восприимчивости, не позволила добиться хорошего соответствия интерпретируемого и рассчитанного полей. Поэтому мы пошли по пути упрощения модели и ее расчета с использованием средневзвешенной величины и направления намагниченности пород для всего объема толщи аргиллитов с сильно выраженной обратной намагниченностью. Моделирование петромагнитного разреза в 2,5D варианте было выполнено с применением про-

граммы АСОМ-РГ Ю.И. Кузьмина [Справочник ..., 1990] вдоль линии А2—А3 (рис. 5). Геометрия аномалиеобразующего тела аппроксимировалась горизонтальной призмой, ограниченной по простиранию плоскими поверхностями (алгоритм Кравцова). Поскольку образцы, по которым определялись магнитные свойства, не были ориентированы по азимуту, то склонение вектора остаточного намагничивания было выбрано в направлении от самого большого минимума на сопряженный максимум  $\Delta T_a$ . Наклонение вектора остаточного намагничивания, исходя из их средних значений по толще аргиллитов (см. таблицу), взято равным – 44°.

Подбор выполнялся в интерактивном режиме. Расчет кривой  $\Delta T_a$  от объемной модели нулевого приближения, построенной с максимальным учетом априорных геолого-геофизических данных, заключался в корректировке значения остаточной намагниченности, геометрии фланговых частей тела и положения верхней кромки основного объекта — магнитоактивной толщи аргиллитов (см. рис. 5). Оптимальное сходжение сложной двугорбого вида наблюдаемой кривой  $\Delta T_a$  с теоретической от объемной модели нулевого приближения было достигнуто с минимумом итераций при незначительном уточнении вышеозначенных параметров, что свидетельствует о корректности выполненных построений в целом.

Более сложной и неоднозначной оказалась задача моделирования петроплотностного разреза Ильинецкой структуры в целом (в границах ее внешних зон больших значений градиента поля аномалий силы тяжести), что связано как с многочисленностью факторов, определяющих наблюдаемый гравитационный минимум, так и с объективной невозможностью получения для них представительных объемных и плотностных параметров. Тем не менее высказанные соображения о структурно-вещественной природе Ильинецкого минимума силы тяжести были воплощены в ее объемной петроплотностной модели нулевого приближения, которая в последующем уточнена по результатам совмещения теоретической и наблюдаемой кривых  $\Delta g_a$  вдоль линии А1—А2 (см. рис. 5). При принятом нами значении избыточной плотности разуплотненных (трещиноватых) пород (– 0,1 г/см<sup>3</sup>) для объяснения высокоамплитудного (6,5 мГал) Ильинецкого минимума, помимо других факторов, необходимо, чтобы нижняя кромка пород достигала значительных глубин (> 2 км). Понятно, что это лишь один из возможных вариантов петроплотност-

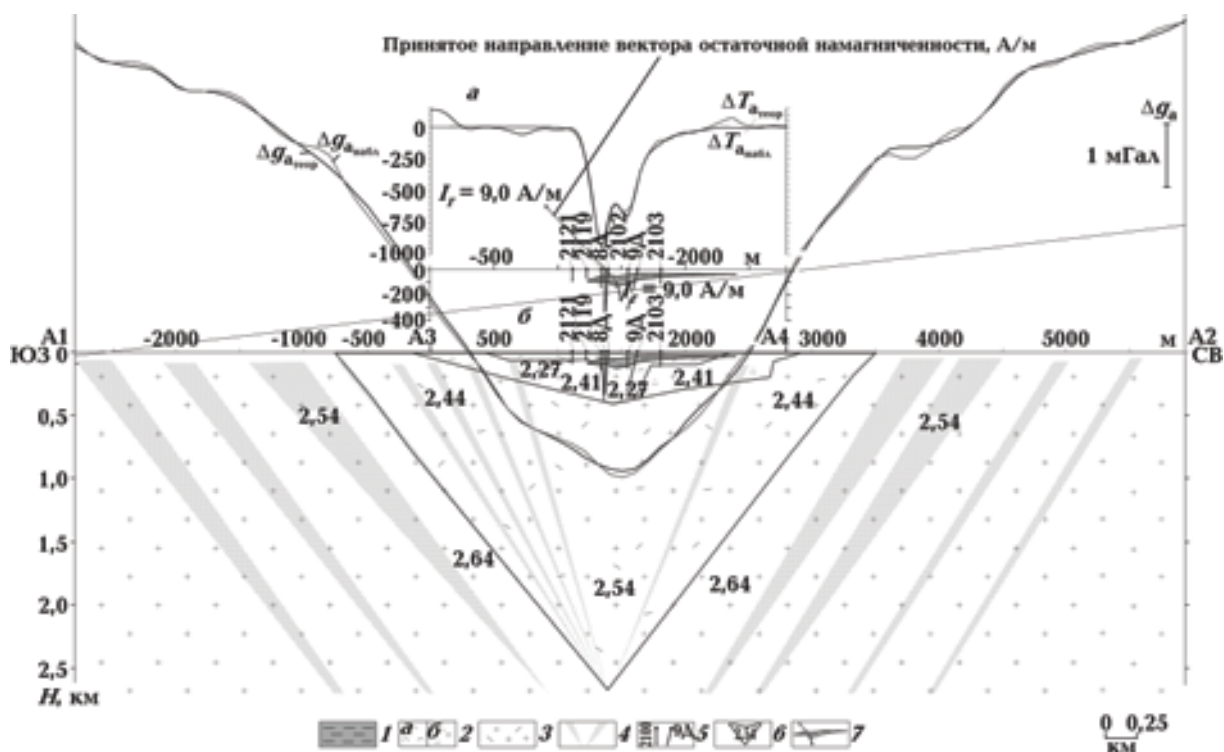


Рис. 5. Результаты магнитного (А3—А4) и плотностного моделирования разреза (А1—А2) Ильинецкой структуры: 1 — аргиллиты с высокой обратной намагниченностью; 2 — брекчия аллогенная: преимущественно туфоподобного (а), гранитоидного (б) состава; 3 — гранитоиды сильнотрещиноватые; 4 — тектонические зоны повышенного разуплотнения; 5 — картировочно-структурные скважины и их номера; 6 — сечения гравитирующих аномалиеобразующих объектов (цифры — подобранная плотность, г/см<sup>3</sup>); 7 — сечение магнитного аномального объекта (стрелки — направление вектора индуктивной намагниченности, А/м).

ной модели Ильинецкой структуры, но в любом случае в принципиальном отношении она вряд ли может существенно измениться.

**Обсуждение результатов и выводы.** Подводя итоги выполненного анализа и интерпретации всех доступных нам геолого-геофизических материалов, следует особо подчеркнуть следующие аспекты, которые, по нашему мнению, могут иметь большое значение в аргументации ответов на некоторые проблемные вопросы строения и генезиса Ильинецкой структуры. При этом мы сознательно не затрагиваем здесь чисто геологические моменты данной проблемы, такие как наличие в породах Ильинецкого объекта планарных структур, импактных алмазов, кстати, подтвержденных и нашими находками.

Ильинецкая структура по характеру своего проявления в поле аномалий силы тяжести характеризуется в целом асимметрией концентрически-зональных черт своего внутреннего строения, что присуще как объектам эндогенного генезиса, так и импактно-взрывным струк-

турам. Если принять за основу последнюю гипотезу, то можно сделать предположение об имевшем место наклонном ударе космического тела, влетевшего в атмосферу в направлении с северо-запада на юго-восток.

Рельеф поверхности кристаллического щоколя центральной части Ильинецкой структуры имеет весьма сложный характер. Главным гравитирующим структурно-тектоническим элементом всей Ильинецкой структуры является ее небольшая по площади (2 × 1 км) центральная кальдера воронкообразной формы с "подводящим" каналом неустановленной бурением глубиной заложения (более 330 м), заполненным аллогенной брекчией низкой плотности. Можно также предположить наличие здесь еще одного подобного канала, соединяющегося на больших глубинах с первым.

В области центральной кальдеры Ильинецкой структуры отмечается определенная детерминированная связь между составом аллогенной брекчии и ее местоположением в этой объ-

емной постройке — брекчия с включениями преимущественно осадочного состава тяготеет к эпицентру кальдеры, а гранитоидного состава — к ее периферийной области.

Сложный воронкообразный характер рельефа поверхности подстилающего центральную кальдеру кристаллического цоколя, присутствие здесь установленного бурением глубокого канала, определенная закономерность во внутри- и закратерном распределении брекчии в большей мере присущи объектам вулкано-магматического генезиса.

Природа отрицательных магнитных аномалий различной интенсивности, наблюдаемых в эпицентральной части Ильинецкой структуры, объясняется наличием в разрезе толщи аргиллитов невыдержанной мощности, обладающей сильно выраженной намагниченностью обратного знака, носителями которой являются ферромагнитные минералы — маггемит, магнетит, не характерные для туфобрекчии за пределами этого минимума. К этой же толще по данным спектрального анализа приурочиваются аномалии платиноидов, а в перекрывающих их туфоподобных породах — аномалии Cu, Zn, Li, Ag, Pb. При этом обращает на себя внимание отсутствие повышенных концентраций Ni, Co, Cr, характерных элементов космических тел, которыми должны быть обогащены породы структуры, как это установлено для ряда других импактов подобного типа [Сергиенко и др., 2010]. Отмеченные обстоятельства, как и наличие здесь высокоамплитудных магнитных минимумов, свойственных магнитному полю вулканов и кальдер [Дабижа, Федьинский, 1979], также являются дополнительными аргументами в пользу, хотя бы частично, эндогенной гипотезы генезиса Ильинецкой структуры.

Установленная разнонаправленность вектора внешнего намагничивающего поля толщи осадочных (?) пород центральной кальдеры Ильинецкой структуры свидетельствует, что синхронность образования отсутствует не только в части эффузивов и туфобрекчии и что весь процесс накопления, седиментации, брекчирования осадочной толщи протекал в течение периода длительностью не менее эпохи смены полярности магнитного поля Земли. Этот вывод хорошо согласуется с результатами определения абсолютного возраста подстилающих толщу аллогенной брекчии расплавленных пород импактного характера, которые по данным абсолютных определений аргон-аргоновым методом и результатам палеомагнитных исследований, выполненных в Хельсинкском универ-

ситете, составляют ~ 445 млн лет [Гуров, Гожик, 2006; Pesonen et al., 2004], что соответствует позднему ордовики. При этом авторам не удалось "синхронизировать" время возникновения остаточной намагниченности тагамитов, зювитов и других пород всей исследуемой толщи (445—400 млн лет) с импактным событием (445 млн лет). Представляется естественным, что импактное событие любой масштабности не может обеспечить столь длительное протекание процессов (около 50 млн лет), которыми связана остаточная намагниченность, в том числе разной величины и полярности.

Согласно абсолютной шкале магнитной стратификации именно этот период характеризовался неоднократным изменением прямой и обратной направленности магнитного поля Земли, с преобладанием прямой в начале и обратной в конце приведенного временного интервала [Geologic ..., 2008]. Спорово-пыльцевой анализ осадочной брекчии также указывает на раннесреднедевонский возраст (~ 390 млн лет) их накопления, что как раз соответствует эпохе обратной полярности магнитного поля Земли.

Наличие в разрезе скважин, пробуренных в эпицентрах двух магнитных минимумов наибольшей интенсивности, пород с разнополярной намагниченностью, признаков их многократного брекчирования и гидротермальной минерализации свидетельствуют в пользу неоднородности (не синхронности) всего процесса становления Ильинецкой структуры. С учетом результатов определения геологическими методами абсолютного возраста пород, отобранных в различных местах Ильинецкой структуры, можно предположить, что начало процесса ее становления относится к позднему ордовики, а его активная фаза завершилась в раннем девоне. Анализ других структур импактного типа [Scott et al., 1995; Сергиенко и др., 2010] свидетельствует об одноактном событии и о возможности объяснения именно им всего многообразия магнитных и плотностных свойств пород, характера магнитного и гравитационного полей и т. д.

В нашем случае существует многочисленная группа различного рода достаточно объективных аргументов в пользу той или иной гипотезы генезиса Ильинецкой структуры. Не принимая в этой дискуссии за окончательную ни одну из них, хотелось бы предложить для обсуждения некий компромиссный вариант решения этой проблемы.

Действительно, первоначальным актом образования Ильинецкой структуры мог быть ко-

сой удар о Землю космического тела, влетевшего где-то в позднем ордовике в атмосферу в направлении с северо-запада на юго-восток. В результате одновременно в кристаллическом фундаменте образовалась классическая для таких событий асимметричная структура с депрессией чашеобразной формы в ее центральной части, сопровождаемая образованием во вмещающих породах планарных структур, импактных алмазов, становлением системы кольцевых разломов и выбросом, в основном за пределы образовавшейся депрессии, брекчии преимущественно гранитоидного состава.

Примерно через 50 млн лет, уже в период возможной раннедевонской тектонической активизации Немировского коромантийного разлома, в эпицентре удара космического тела был запущен механизм возникновения эруптивного вулканического аппарата с центральным (возможно, и с боковыми соплами) подводным каналом, через который в верхнюю часть разреза начали поступать минерализованные потоки гидротерм и флюидов, произошло накопление специфичной минерализации и повторное брекчирование. Благодаря существующей в этот период обратной полярности магнитного поля Земли такая же направленность намагничивания была наведена в минералах-ферромагнетиках, сорбированных в толще аргиллитов.

В постдевонское время в результате процессов поверхностной денудации были полностью уничтожены закратерные импактные и вулканические выбросы. Сохранились эти отложения лишь в верхней части подводного канала и в наиболее погруженных местах вулканической кальдеры. И в дальнейшей истории своего геологического развития Ильинецкая стру-

ктура, по-видимому, неоднократно испытывала тектонические подвижки (уже без признаков вулкано-магматической деятельности), что проявляется даже в элементах дешифрирования современного земного рельефа.

Так, в геоморфологическом отношении Ильинецкая структура приурочивается к части водораздела амплитудой 30 м между р. Соб и его правым притоком р. Сибок с отчетливо выраженной куполовидной формой. Однако в случае одноактного импактного образования Ильинецкой структуры, по-видимому, более естественным было бы ожидать наличия здесь в земном рельефе морфовпадины, как это свойственно классической Болтышской астроблеме.

Предложенная концепция зарождения и становления Ильинецкой структуры хорошо укладывается в рамки гипотезы [Беляшов, 1998; 2001], один из постулатов которой гласит, что ударно-метеоритные события в истории Земли приводят к появлению кольцевых разломов в земной коре и их последующей тектономагматической активности.

Понятно, что изложенные соображения относительно возможного генезиса Ильинецкой структуры требуют дополнительных фактов и исследований. Большим вкладом для разрешения этой проблемы могли бы стать сейсмические работы и бурение в эпицентре структуры глубокой (не менее 600 м) скважины.

Надеемся, что приведенные в настоящей статье фактические данные и сделанные на их основе выводы помогут восполнить некоторые упущения предыдущих этапов работ и будут способствовать созданию более полной и аргументированной концепции строения и развития Ильинецкой структуры.

### Список литературы

- Беляшов А. В. Тектоника кумулятивных структур // Литосфера. — 1998. — № 9. — С. 87—97.
- Беляшов А. В. Типы кумулятивно-ударных структур. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электроразведочных полей // Матер. 28-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского. — Москва: ОИФЗ РАН, 2001. — С. 15—17.
- Виноградов Г. Г., Палий Д. П. Геологическая карта масштаба 1 : 50 000 территории листов М-35-107-В и М-35-107-Г. — Киев: Фонды УТГФ, 1973.
- Гинтов О. Б., Шевченко Т. П., Голуб В. Н. Об эндогенной природе Ильинецкой структуры // Геол. журн. — 1975. — 35, № 1. — С. 52—60.
- Гуров Е. П., Гожик П. Ф. Импактное кратерообразование в истории Земли. — Киев: Изд. Ин-та геол. наук НАНУ, 2006. — 218 с.
- Дабижа А. И., Федьинский В. В. Геофизическая характеристика метеоритных кратеров // Мете-



- оритные структуры на поверхности планет. — Москва: Наука, 1979. — С. 99—116.
- Деркач С. С. Проект на проведение геологического доизучения масштаба 1 : 200 000 территории листа М-35-XXX (Гайсин). — Киев: Фонды ПДРГП "Північгеологія", 2005.
- Ентин В. А. Геофизические феномены Украины // Мінеральні ресурси України. — 2010. — № 4. — С. 18—25.
- Завойский В. Н. Вычисление магнитных полей от анизотропных трехмерных тел в задачах магниторазведки // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1978. — № 1. — С. 76—85.
- Крутиховская З. А., Пашкевич И. К., Силина И. М. Магнитная модель и структура земной коры Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 1982. — 216 с.
- Михайлова Н. П., Гинтов О. Б., Карзанова А. Я., Кравченко С. Н. О природе Ильинецкой кольцевой структуры в свете палеомагнитных данных // Геол. журн. — 1978. — 38, № 5. — С. 51—58.
- Нечаєва Т. С., Горкавко В. М., Шимків Л. М., Єнтин В. А. Карта аномального магнітного поля  $\Delta T_a$  України. — 1 : 1 000 000. — Київ: ПДРГП "Північгеологія" Мінекоресурсів України, 2002. — 2 л.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа // Геофиз. журн. — 2000. — 22, № 6. — С. 148—165.
- Плохотниченко Д. И., Прытков Ф. Я. Отчет Коростышевской партии № 49 Кировской экспедиции за 1968 год о специализированной подготовке площадей к глубинным поискам месторождений урана. — Киев: Фонды УТГФ, 1968.
- Сергиенко Е. С., Цельмович В. А., Попов В. В., Дробикина Е. А., Цибульская А. Е., Петров И. Н. Микроструктура, состав и магнитные свойства зювитов Карской астроблемы // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: Матер. Междунар. семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород, Санкт-Петербург, 20—24 сентября 2010 г. — Санкт-Петербург, 2010. — С. 227—233.
- Справочник геофизика. Гравиразведка / Под ред. Е. А. Мудрецової, К. Е. Веселова. — Москва: Недра, 1990. — С. 607.
- Ушакова Н. И., Цымбал П. Н. Отчет о работах Винницкой геофизической партии за 1957 год. — Киев: Фонды УТГФ, 1957.
- Geologic time scale. International Commission on Stratigraphy. — 2008. — [www.stratigraphy.org](http://www.stratigraphy.org).
- Gurov E., Koeberl C., Reimold W. Petrography and geochemistry of target rocks and impactites from the Ilyinets Crater, Ukraine // Meteor. Planet. Sci. — 1998. — 33. — P. 1317—1333.
- Pesonen L. J., Mader D., Gurov E. P., Koeberl C., Kinnunen K. A., Donadini F., Handler R. Paleomagnetism and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determinations of impactites from the Ilyinets structure, Ukraine // Cratering in Marine Environments and on Ice. — Berlin-Heidelberg: Springer, 2004. — P. 251—280.
- Scott R. G., Pilkington M., Tanczyk E. I., Grieve R. A. F. Magnetic Properties of Three Impact Structures in Canada // Meteoritics. — 1995. — 30, № 5. — P. 576.