

Пространственно-временные изменения геомагнитного поля и сейсмичность

© М. И. Орлюк, А. В. Марченко, А. А. Роменец, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 12 октября 2017 г.

Виконано аналіз просторово-часових змін магнітного поля Землі та її сейсмічності за період 1950—2015 рр. Для аналізу використано 12-ту модель міжнародного геомагнітного аналітичного поля Землі $B_{IGRF-12}$ (2015—2020). Ця модель дає змогу вивчати характерні особливості магнітних аномалій з розмірами в перші тисячі кілометрів. Для визначення часових змін геомагнітного поля dB/dt було створено числові масиви даних B_{IGRF} для періоду 1950—2015 рр. за сіткою $1^\circ \times 1^\circ$ та інтервалом 5 років. Часові зміни геомагнітного поля за період 1950—2015 рр. було розділено його усередненням на умовно довгохвильову «ядрову» та короткохвильову «мантіїно-літосферну» складові. Для «ядрової» компоненти поля виділено три фокуси з від'ємним і два з додатним градієнтами геомагнітного поля. Зміна і градієнт поля в цих фокусах за 65 років змінюються в межах від -6600 до 2000 нТл (від -100 до 30 нТл/рік) і характеризуються істотним західним дрейфом. Для «мантіїно-літосферної» компоненти геомагнітного поля виділено 12 фокусів з позитивним і 10 з негативним градієнтом поля. При цьому за 65 років більшість фокусів не змінили свого місця розташування, а зміна поля і його градієнт становлять 175 — 490 нТл ($(2,5$ — $7,5)$ нТл/рік) для додатних і $-(220$ — $535)$ нТл ($-(3,4$ — $8,2)$ нТл/рік) для від'ємних величин приростів поля. Для планети в цілому виявлено меншу сейсмічність південно-західної області, яка характеризується істотним зменшенням «ядрової» частини поля порівняно з північно-східною гемісферою. Виявлено взаємозв'язок між ділянками з підвищеною сейсмічною активністю, фокусами мантіїно-літосферної складової геомагнітного поля та областями її змін, які у тектонічному відношенні відповідають зонам зчленування літосферних плит «субдукційного», «колізійного» і «серединноокеансько-рифтового» типів. На підставі виявлених закономірностей запропоновано два механізми такого зв'язку: а) «температурно-магнітний», зумовлений зануренням магнітних блоків океанічної кори в зоні субдукції, а також серпентинізацією ультраосновних порід верхньої мантії; б) «флюїдогазово-магнітний», який ґрунтується на утворенні та трансформації залістих мінералів під впливом мантіїних газів і флюїдів. Магнітні блоки літосфери Землі є міцнішими порівняно з немагнітними. Таким чином, у межах блоків, а також на їхніх краях можливе накопичення більших напружень і, відповідно, передумов формування осередків землетрусів.

Ключові слова: геомагнітне поле, сейсмічність, плити літосфери, намагніченість, глибинні флюїди.

Введение. Поиску и анализу возможной связи между сейсмическими событиями и магнитными возмущениями внешнего и внутреннего происхождения посвящено много работ [Левшенко, 1995; Кузнецова та ін., 2005; Гохберг, Шалимов, 2008; Сергеева и др., 2009; Богданов и др., 2009; Шуман, 2010, 2012; Собисевич и др., 2010, 2012,

2013а,б; Гульельми, Зотов, 2012; Щербина, 2013; Mavrodiev et al., 2015; Ягодин, 2015]. Намного меньше публикаций [Кочергин и др., 1980; Орлюк, Пашкевич, 1993; Пашкевич и др., 1993; Собисевич и др., 2014; Орлюк и др., 2016б], в которых проанализированы длинноволновые аномалии геомагнитного поля и магнитная неодно-

родность областей коры и литосферы, где происходят сейсмические события. Поскольку зоны повышенной сейсмичности можно считать своеобразными «маркерами» реализации на поверхности планеты глубинных геодинамических процессов, то будем сопоставлять их с современными изменениями модуля индукции главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) B_{IGRF} . ГМПЗ зависит от источников в жидком ядре и мантии, а его изменения — от динамических процессов в этих слоях Земли. Таким образом, и сейсмичность, и изменение геомагнитного поля обусловлены одними и теми же современными геодинамическими процессами в ядре и мантии Земли, что позволяет проводить их совместный анализ. В историческом аспекте данному вопросу были посвящены исследования, проводимые еще в первой половине XX в. В обобщающей работе [Оль, 1949] обращено внимание на приуроченность фокусов векового хода вертикальной компоненты геомагнитного поля для временного интервала 1912,5—1942,5 гг. к областям повышенной сейсмичности Земли. Были проанализированы две гипотезы природы вековых изменений геомагнитного поля: 1) вертикальные перемещения намагниченных пород и их подкоровые течения; 2) физические процессы на границе жидкого ядра. Фактические данные на тот момент позволили А. И. Олю отдать предпочтение первой гипотезе. Главным критерием при этом была пространственная совмещенность источников данных явлений. С тех пор общепринято [Finlay et al., 2016], что аномалии векового хода имеют источники в жидком ядре Земли и, по-видимому, сейсмичность может быть связана с ними только опосредованно. Представляется, что для такого рода сопоставлений необходимым является выделение части геомагнитного поля, предположительно связанной с верхней мантией и литосферой. Разделение поля на главное магнитное (поле ядра) и аномальное магнитное (поле литосферы) производится путем его представления сферическим гармоническим рядом разной длины: $n=1 \div 13$ — поле ядра, n от 14 до

16—720 и т. д. — поле литосферы [Purucker, Whaler, 2007; Finlay et al., 2016]. Однако, как показано в ряде публикаций, существуют магнитные модели крупных тектонических структур (древние платформы, континенты и т. д.), аномалии от которых с длинами волн 3000—5000 км, в соответствии со сферическим гармоническим анализом, будут относиться к полю ядра [Fedorova, Shapiro, 1998; Thébaud et al., 2010]. В дальнейшем анализе использовалась 12-я модель ГМПЗ — $B_{IGRF-12}$ с длиной сферического ряда 13-го порядка, что обуславливает наличие аномалий с длинами волн до 3000 км [Mandea, Korte, 2011; Thébaud et al., 2015]. В соответствии с работами [Симоненко, 1976; Петромагнитная..., 1994; Орлюк, Пашкевич, 1995; Pashkevich, Orlyuk, 1997], магнитные аномалии с длиной волны 2000—4000 км могут быть вызваны суперпозиционным эффектом литосферных источников. Следовательно, в ГМПЗ может присутствовать эффект литосферных магнитных источников. Для проверки этого предположения выполнено разделение ГМПЗ на две разноволновые составляющие: «ядровую» и «мантийно-литосферную», и исследован их вековой ход для временного интервала 1950—2015 гг.

Вековые изменения геомагнитного поля. ГМПЗ состоит из дипольной и недипольной частей и принимается за нормальное поле Земли при выделении аномальной компоненты, связанной с литосферой. Значение модуля индукции главного поля на поверхности Земли характеризуется существенной пространственной неоднородностью от 60000—65000 нТл на магнитных полюсах до 20000—35000 нТл на магнитном экваторе (рис. 1) [Thébaud et al., 2010]. Согласно экспериментальным данным магнитное поле Земли на протяжении последних 300 лет постоянно ослабляется и за период с 1950 по 2010 г. среднее значение модуля индукции на поверхности планеты уменьшилось на 1300 нТл [Орлюк, Роменец, 2011].

Для определения временного градиента модуля индукции ГМПЗ были созданы числовые массивы данных B_{IGRF} для периода

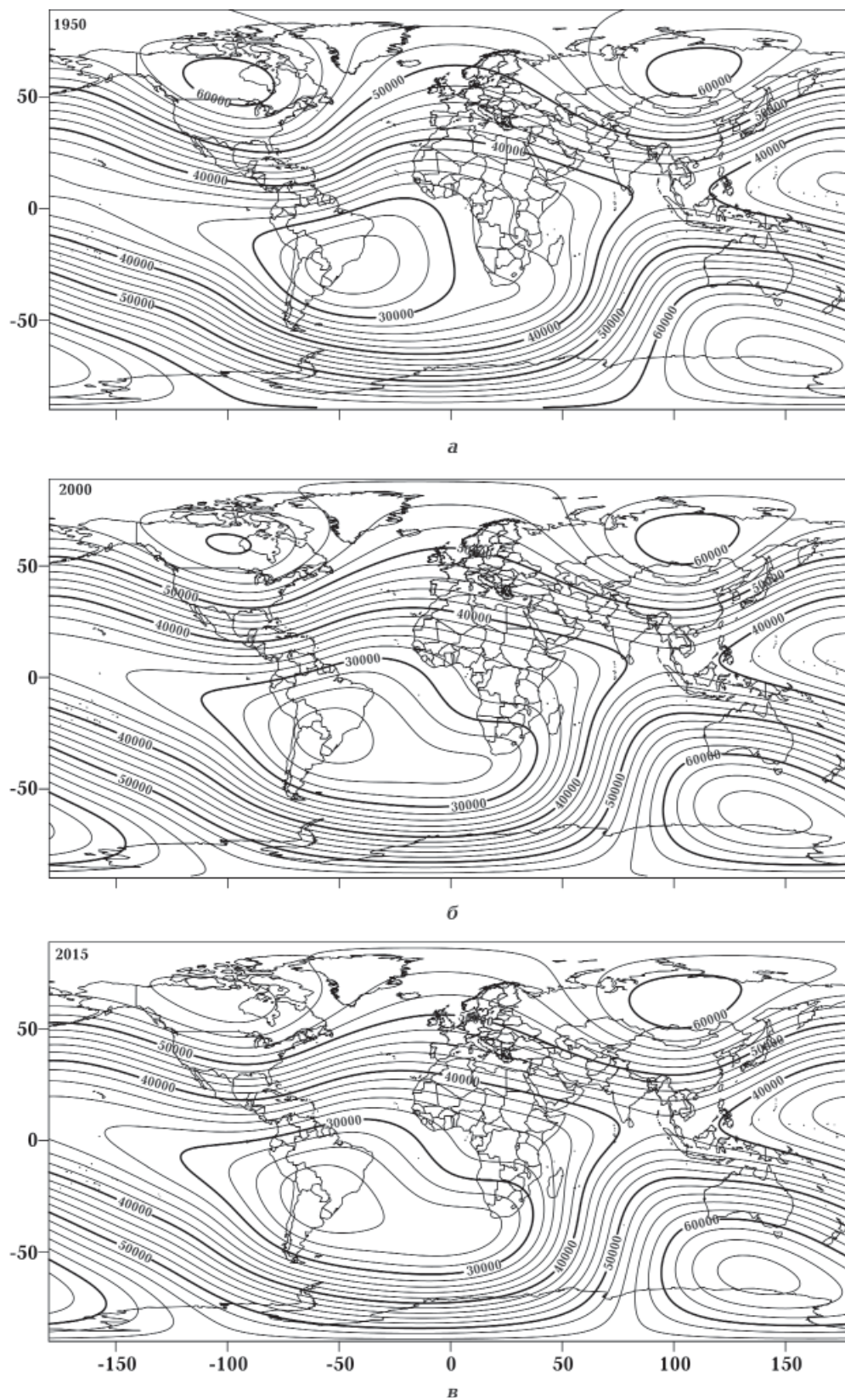


Рис. 1. Модуль индукции главного магнитного поля Земли V_{IGRF} на эпохи 1950 (а), 2000 (б) и 2015 (в) годов (изолинии в нанотесла).

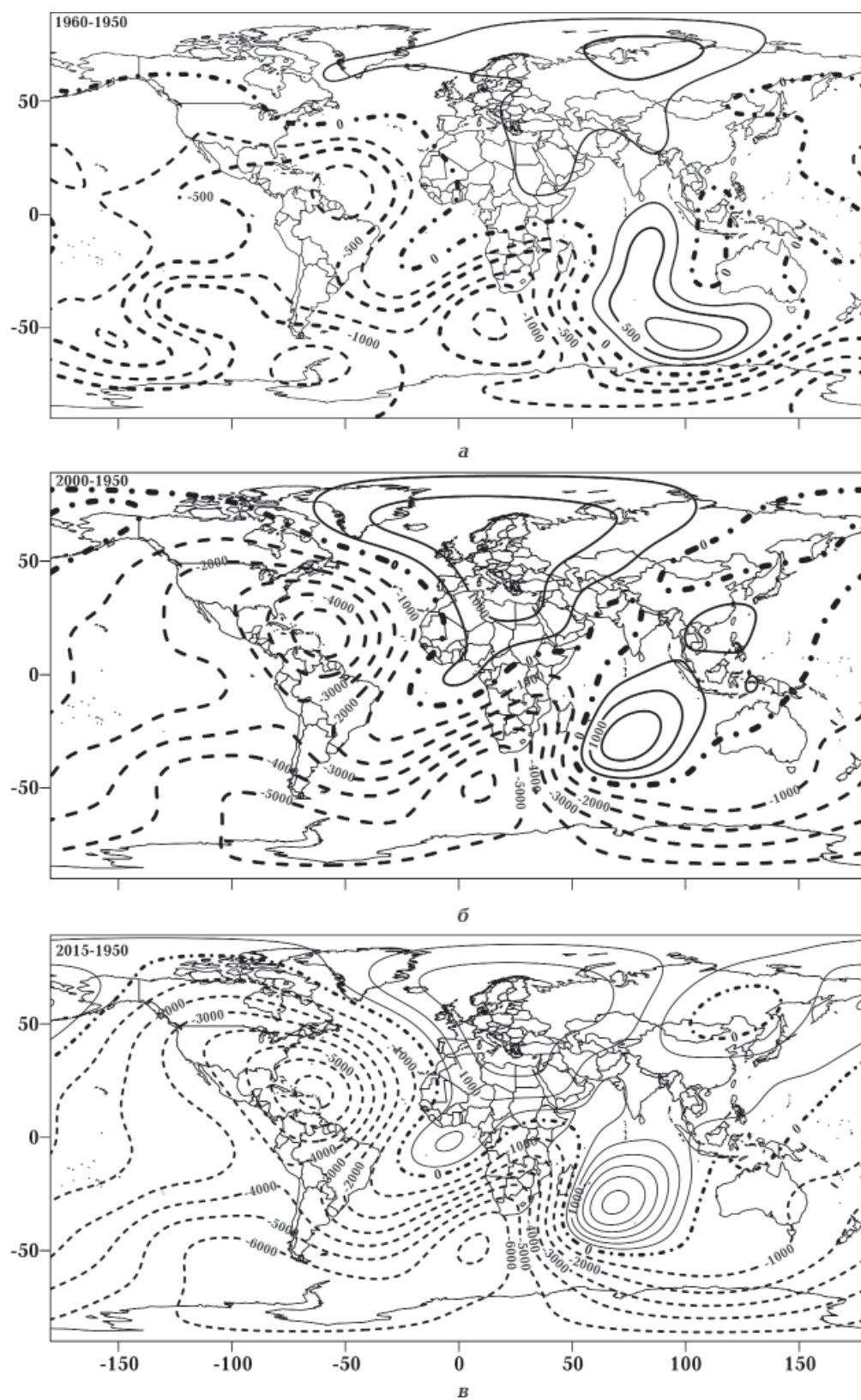


Рис. 2. Временной градиент главного магнитного поля Земли dV_{IGRF}/dt для временных интервалов 1960—1950 (а), 2000—1950 (б), 2015—1950 (в) (изолинии в нанотесла).

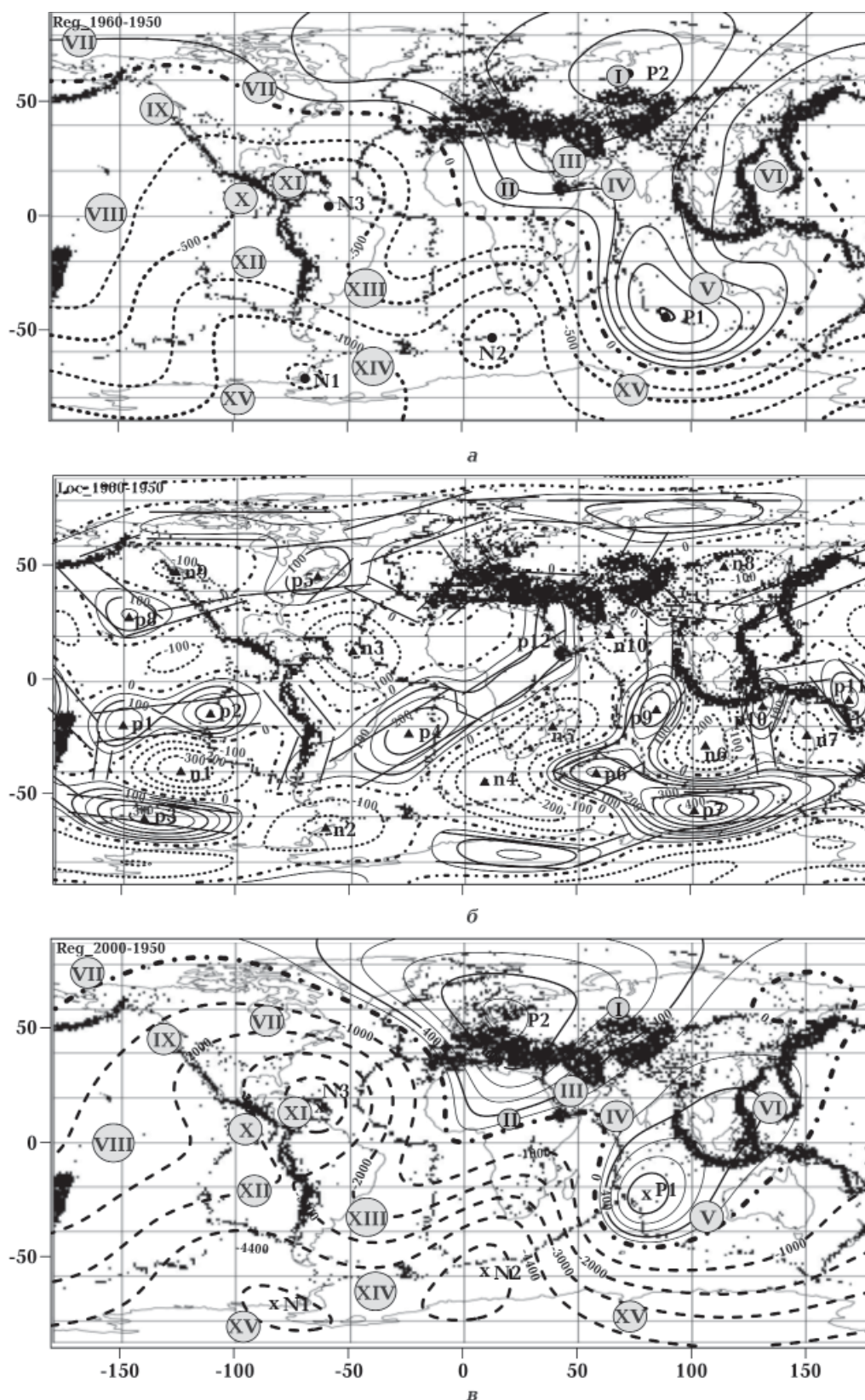
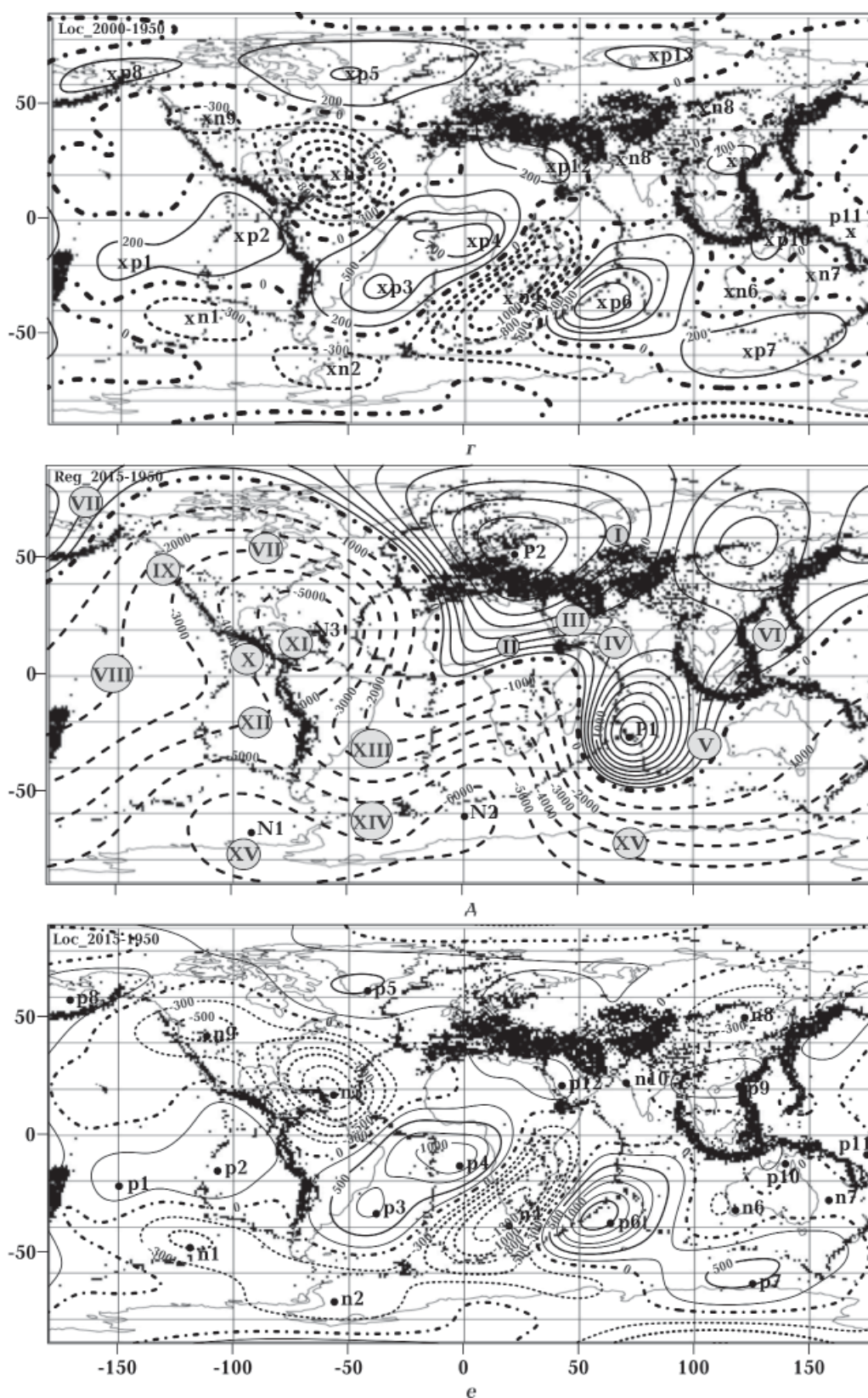


Рис. 3. Сопоставление сейсмичности (черные кружки) с временным градиентом «ядровой» dB_{IGRF}/dt и 1950—2015 гг. (а, б). Черными прямыми линиями обозначены полосы положительного временного градиента плиты: I — Евразийская, II — Африканская, III — Аравийская, IV — Индостанская, V — Австралийская, VI — Индонезийская, VII — Тихоокеанская, VIII — Северо-Американская, IX — Южно-Американская, X — Карибская, XI — Карибская, XII — Наска, XIII — Южно-Американская, XIV — Скоша, XV — Антарктическая.



«мантийно-литосферной» $dB_{M-лГРФ}/dt$ составляющих за период 1950—1960 гг. (а, б) 1950—2000 гг. (в, г) «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля. Римские цифры в кружках — литосферные VI — Филиппинская, VII — Северо-Американская, VIII — Тихоокеанская, IX — Хуана де Фука, X — Кокос,

1950—2015 гг. по сети $1^\circ \times 1^\circ$ и интервалом в 5 лет. За начало расчета принят 1950 г., в дальнейшем градиент поля за 5 лет определяется как разница между его значениями в 1955 и 1950 г. $(dB_{IGRF(1955-1950)}/dt = V_{IGRF(1955)} - V_{IGRF(1950)})$, за 10 лет — как разница между 1960 и 1950 г. $(dB_{IGRF(1960-1950)}/dt = V_{IGRF(1960)} - V_{IGRF(1950)})$ и т. д. до 2015 г. Такой подход позволяет анализировать как градиент поля за каждые 5 лет, так и суммарные его величины для более длительных интервалов. На рис. 2, а видно, что градиент поля $dB_{IGRF(1960-1950)}/dt$ за 10 лет изменяется в пределах от -1500 до 1000 нТл (от -150 до 100 нТл/год).

Как показано в работах [Орлюк, Роменец, 2011; Орлюк и др., 2016а], для временного интервала с 1950 по 2000 г. на фоне общего уменьшения магнитного поля планеты выделяются области с экстремальными величинами его изменения: максимумы уменьшения поля от -5500 до -6500 нТл (от -110 до -130 нТл/год) располагаются вблизи Атлантического побережья Центральной Америки (18° с.ш.; -65° з.д.), а также между Африкой и Антарктидой (-50° ю.ш., 10° в.д.) (рис. 2, б). Максимумы увеличения поля (2000 нТл) (40 нТл/год) характерны для Европы (60° с.ш., 30° в.д.) и Индийского океана (30° ю.ш., 80° з.д.).

В общих чертах такая же закономерность сохраняется и в дальнейшем (рис. 2, в).

Разделение временного градиента магнитного поля dB_{IGRF}/dt на разноволновые составляющие проводилось путем осреднения его величин (рассчитанных по сети $1^\circ \times 1^\circ$) с ячейкой $40^\circ \times 40^\circ$. Размер окна осреднения выбирался из тех соображений, чтобы выделить аномалии с длинами волн в первые тысячи километров, источники которых могут иметь «мантийно-литосферную» природу. «Мантийно-литосферная» компонента градиента вычислялась как разность между полными и осредненными его величинами $dB_{M-Л}/dt = dB_{IGRF}/dt - dB_{IGRF40 \times 40}/dt$ (рис. 3). В соответствии с расчетами «ядровая» компонента геомагнитного поля для временного интервала 1960—1950 гг. имеет градиент $dB_{Я,IGRF}/dt$ в пределах от -1300 до 700 нТл (рис. 3, а),

а «мантийно-литосферная» $dB_{M-Л,IGRF}/dt$ — от -400 до 500 нТл (рис. 3, б). Как видно из рис. 3, в, г, для временного интервала 1950—2000 гг. основные изменения в поле происходят также за счет длинноволновой, т. е. «ядровой» компоненты. Величина динамики этой части поля (от -6000 до 1500 нТл) и ее характер находятся в соответствии с величиной суммарных значений dB_{IGRF}/dt [Орлюк, Роменец, 2005] (см. рис. 3, в). Для периода 1950—2015 гг. прирост «ядровой» части поля составляет от -6600 до 2000 нТл (см. рис. 3, д). При этом Земля может быть разделена на две области: северо-восточную с положительным изменением dB_{IGRF}/dt до $+30$ нТл/год и юго-западную с отрицательным до -120 нТл/год. Граница между ними примерно может быть проведена по северо-восточному краю Северо-Американского континента — Азорским островам — юг о-ва Мадагаскар — Большой Австралийский залив — Соломоновы и Маршалловы о-ва Тихого океана — север Скалистых гор. Северо-восточная область положительного прироста магнитного поля имеет условный центр в районе Тянь-Шаня ($75-80^\circ$ в.д., $40-45^\circ$ с.ш.), а юго-западная — на юго-востоке Тихого океана ($100-105^\circ$ з.д., $30-35^\circ$ ю.ш.) (рис. 3, а). В целом северо-восточная область положительного градиента поля охватывает области континентальной коры Евразии, большей части Африки, частично Австралии, а также кору субокеанического переходного типа. Коротковолновая (мантийно-литосферная) компонента градиента поля для периода 1950—2000 гг. имеет более сложный характер с большим количеством максимумов и минимумов с интенсивностью от -1400 до 1300 нТл (от -28 до $+26$ нТл/год) (см. рис. 3, г), при этом подавляющее их большинство не превышает первые сотни нанотесла (от -6 до $+6$ нТл/год). Проанализируем кратко величины изменения прироста геомагнитного поля с 1950 по 2015 г. на основании анализа изменений поля «ядровой» и «мантийно-литосферной» компоненты.

В период 1960—1950 гг. для «ядровой» компоненты поля условно можно выде-

лить три отрицательных фокуса (в районе Антарктического п-ова, между Африканским континентом и Антарктидой и на севере Южноамериканского континента) и два положительных (на юге Индийского океана и в Западной Сибири) фокуса (см. рис. 3, а, б). Как видно из табл. 1, в которой приведены координаты фокусов и градиент поля за соответствующие временные интервалы, они имеют существенные пространственно-временные изменения. В частности, за 65 лет интенсивность фокуса N1 изменилась на -6400 нТл, а по долготе он переместился более чем на 21° с незначительным перемещением по широте (около 3°), что свидетельствует о его существенном западном дрейфе. Сильный западный дрейф характерен и для других фокусов градиента магнитного поля, но при этом интенсивность положительных фокусов меньше в три раза относительно таковой отрицательных фокусов.

Таблица 1. Изменение положения и интенсивности фокусов отрицательного (N) и положительного (P) градиента поля «ядровой» компоненты геомагнитного поля с 1950 по 2015 г.

Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл
1960—1950			
N1	-68,077	-70,679	-1210
N2	13,853	-53,102	-1075
N3	-57,962	5,155	-720
P1	88,683	-44,062	500
P2	72,11	62,407	465
2000—1950			
N1	-83,599	-70,907	-5060
N2	8,502	-56,892	-5350
N3	-63,777	16,758	-4415
P1	80,18	-23,255	1135
P2	18,913	55,231	1240
2015—1950			
N1	-89,695	-66,972	-6400
N2	2,518	-59,68	-6285
N3	-67,348	19,83	-5910
P1	74,029	-25,571	1895
P2	24,159	53,704	1730

Для «мантийно-литосферной» компоненты магнитного поля Земли для периода 1950—1960 гг. можно наметить 12 положительных и 10 отрицательных фокусов градиента поля (см. рис. 3, б и табл. 2). Градиент магнитного поля, как правило, составляет первые десятки нанотесла в год. В частности, с 1950 по 1960 гг. градиент поля находится в пределах $135—430$ нТл для положительных фокусов и $-(120—380)$ нТл для отрицательных. Со временем наблюдается закономерное увеличение или уменьшение величины поля. При этом отдельные фокусы (P3, P4, P6, N3, N4) с максимальными изменениями достигают за 65 лет значений $\pm(1100—1600)$ нТл. Эти же пункты характеризуются максималь-

Таблица 2. Изменение положения и интенсивности фокусов отрицательного (N) и положительного (P) градиента поля «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля с 1950 по 2015 г.

Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл
1960—1950			
N1	-122,972	-39,52	-380
N2	-59,426	-64,585	-220
N3	-47,776	13,081	-310
N4	10,473	-44,109	-300
N5	40,481	-20,103	-265
N6	106,851	-28,223	-300
N7	150,441	-24,596	-155
N8	114,714	50,268	-140
N9	-124,476	46,972	-120
N10	65,275	20,134	-140
P1	-149,449	-19,397	200
P2	-109,91	-14,455	225
P3	-138,505	-60,349	320
P4	-22,711	-23,633	250
P5	-62,251	45,56	140
P6	58,694	-40,734	260
P7	102,262	-56,465	430
P8	-145,471	27,839	160
P9	85,296	-12,695	250
P10	131,85	-11,491	180
P11	169,576	-8,281	165
P12	38,419	22,443	135

Продолжение табл. 2

Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл	Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл
2000—1950				2015—1950			
N1	-120,543	-43,737	-485	N1	-118,706	-44,991	-535
N2	-59,373	-65,626	-380	N2	-58,073	-67,958	-490
N3	-56,763	18,587	-1310	N3	-58,066	19,624	-1550
N4	17,834	-35,576	-1165	N4	15,728	-35,498	-1465
N5	—	—	—	N5	—	—	—
N6	114,064	-32,608	-175	N6	111,639	-29,158	-325
N7	149,87	-25,188	-185	N7	150,963	-24,731	-220
N8	103,247	47,524	-315	N8	114,872	52,494	-430
N9	-112,71	42,702	-355	N9	-111,86	44,022	-560
N10	66,761	25,228	-295	N10	65,159	24,465	-260
P1	-149,448	-19,456	285	P1	-148,41	-19,268	315
P2	-98,966	-8,454	395	P2	-106,763	-12,531	490
P3	-36,569	-30,619	740	P3	-39,698	-30,598	840
P4	2,327	-10,469	835	P4	-4,789	-10,693	1140
P5	-50,422	62,364	510	P5	-43,689	63,414	530
P6	59,051	-37,067	1245	P6	58,906	-34,885	1665
P7	122,269	-58,577	440	P7	118,621	-60,609	575
P8	-154,111	62,363	280	P8	-169,342	59,443	450
P9	115,556	24,523	260	P9	113,109	22,685	335
P10	131,967	-9,978	290	P10	132,734	-9,563	245
P11	167,027	-6,268	190	P11	167,237	-6,042	175
P12	36,483	22,297	275	P12	38,379	23,18	325

ными изменениями пространственного положения (см. табл. 2). По-видимому, пространственно-временные изменения этих фокусов приближают их к фокусам «ядровой» компоненты магнитного поля. Принципиальное отличие в том, что в координатах изменения этих пунктов нет западного дрейфа.

С точки зрения авторов большой интерес вызывают положительные и отрицательные фокусы, местоположение которых не изменяется во времени. Как правило, они характеризуются незначительным градиентом магнитного поля. К таковым относятся фокусы P1, P2, P10, P11, P12 и др., которые находятся на одном и том же месте, в основном в пределах или вблизи границ литосферных плит.

Стоит отметить, что большинство положительных и отрицательных фокусов

находится в пределах условных полос, простирающихся которых не изменяются в исследуемом временном интервале. Также часто трудно выделить отдельный фокус из-за вытянутости аномалий градиента магнитного поля и из-за того, что они могут мигрировать вдоль выделенных полос.

Как уже было отмечено, в «стабильных» фокусах градиент поля составляет первые сотни нанотесла за 65 лет, от 175 нТл для фокуса P11 до 490 нТл для P2 (т. е. в пределах 2,5—7,5 нТл/год). Такая же картина характерна и для фокусов с отрицательным градиентом. В частности, фокусы N1, N2, N7, N10 практически не изменяют своего местоположения, а прирост поля за 65 лет находится в пределах от 220 нТл (N7) до -535 нТл (N1) (-3,4—8,2) нТл/год). Важно, что фокусы «мантийно-литосферной» составляющей стоят на месте либо изменяют

свое местоположение в пределах определенных полос, не испытывая при этом хорошо выраженного западного дрейфа. По-видимому, в связи с выполненным анализом в очередной раз можно поставить вопрос о неоднозначности разделения геомагнитного поля на нормальную и аномальную компоненты и неоднозначной интерпретации природы источников материковых аномалий. Материковые аномалии и частая приуроченность к ним фокусов векового хода могут быть объяснены как намагниченностью земной коры, так и источниками в самых верхних слоях внешнего ядра, которые жестко связаны электромагнитным взаимодействием с твердой мантией [Андреев, 1960; Русаков, 1969; Петрова, 1976; Почтарев, 1983; Колесова, 1985]. Вероятно, включение «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля в аномалии модуля индукции ΔB позволит провести их интерпретацию с наличием источников не только в земной коре, но и в верхней мантии, что существенно повысит возможности геомагнитного метода относительно исследования состава и процессов в этих слоях Земли.

Современная сейсмичность Земли, которая оценивается общим количеством землетрясений за исследуемый временной интервал (Catalog Global CMT, <http://www.globalcmt.org>), сконцентрирована в двух мегапоясах: Тихоокеанском (сейсмически активные области Аляски, Алеутских островов, Камчатки, Курильских островов, Японии, Филиппин, Новой Зеландии, Южной, Центральной и Северной Америки) и Средиземноморско-Трансазиатском (тянется в субширотно-юго-восточном направлении по Средиземному морю и прилегающим к нему южноевропейским горным массивам, а также горам Северной Африки и Малой Азии, хребтам Кавказа и Ирана, через Среднюю Азию, Гиндукуш к Куэнь-Луню и Гималаям до Индонезии). Область Океании можно интерпретировать в качестве условного пересечения этих двух сейсмических поясов.

Вековые изменения магнитного поля и сейсмичности Земли. Прежде всего отме-

тим широтно-диагональную систему простирания главных структурных элементов зон сейсмичности и изменений геомагнитного поля, а также меньшую насыщенность участками с повышенной сейсмичностью юго-западной области (рис. 3), которая характеризуется уменьшением геомагнитного поля по сравнению с северо-восточной областью Земли. На северо-восточную область положительных величин градиента «ядровой» компоненты магнитного поля $dB_{\text{яIGRF}}/dt$ приходятся зоны сейсмичности Средиземноморско-Трансазиатского пояса и западно-юго-западная часть Тихоокеанского пояса, а также срединных хребтов Индийского и Тихого (северо-восточного простирания) океанов (см. рис. 3, а, б). Интересно, что усложнение строения и нарушения (утолщение, смещение, изменение направления простирания и т. д.) зон повышенной сейсмичности доминирующего северо-западного простирания приурочены к зонам с отрицательным или положительным приростом dB_{IGRF}/dt северо-восточного простирания. В частности, в зоне Южноафриканско-Колымской полосы северо-восточного простирания относительного уменьшения геомагнитного поля наблюдается смещение сейсмических областей Срединного хребта Индийского океана и Средиземноморско-Трансазиатского поля на северо-восток и своего рода раздробление сейсмоактивных зон ряда участков (см. рис. 3). Менее наглядно такая же закономерность наблюдается и на западе Северной Америки. Отмеченная ранее закономерность принадлежности большего количества полос с повышенной сейсмичностью к северо-восточной области, которая характеризуется положительным градиентом dB_{IGRF}/dt , находит подтверждение и на «мантийно-литосферном» уровне. Как видно на рис. 3, б, г, е, за последние 65 лет подавляющее большинство сейсмических участков и полос приходится на области существенного положительного градиента геомагнитного поля или же зон его своеобразных «пережимов», а также повышенных горизонтальных градиентов.

Более того, чрезвычайно интересным является факт принадлежности областей с положительным градиентом геомагнитного поля для разных типов сочленения плит — «субдукционного», характерного для сочленения литосферы континентального и океанского типов, океанского («срединно-океанических хребтов») и коллизионного («континентального») типов. В частности, повышенными значениями прироста геомагнитного поля северо-восточного простирания характеризуется область тройного сочленения срединно-океанических хребтов в Индийском океане, которые разделяют Африканскую, Австралийскую и Антарктическую плиты, а также субдукционные зоны между Филиппинской и Евразийской, и между Тихоокеанской и Северо-Американской плитами. Создается впечатление, что и зоны срединно-океанических хребтов, и зоны субдукции контролируются системой глубинных мантийных линейментов. Интерес вызывают большие величины градиента «мантийно-литосферной» компоненты для срединно-океанических хребтов по сравнению с таковыми для двух других типов сочленения литосферных плит включительно с зонами субдукции.

Следующим важным моментом является тот факт, что западному дрейфу подвержена только «ядровая» часть магнитного поля Земли, а фокусы «мантийно-литосферной» компоненты не изменяют своего пространственного положения. В соответствии с анализом вековых изменений геомагнитного поля для периода 2015—1950 гг. фокусы «ядровой» компоненты поля имеют существенный западный дрейф (до 20° за 65 лет). Как факт следует отметить, что при общей тенденции дрейфа в западном направлении выявленные фокусы часто смещаются по областям с повышенной сейсмичностью, т. е. вдоль границ литосферных плит или коллинеарно к ним. В противоположность фокусам «ядровой» компоненты поля фокусы «мантийно-литосферной» составляющей геомагнитного поля практически остаются на месте для исследуемого временного интервала (см. рис. 2, б). Данный факт служит

очень сильным аргументом в пользу того, что в геомагнитном поле присутствуют аномалии мантийно-литосферной природы, а их приуроченность к областям сочленения литосферных плит свидетельствует об относительно небольших глубинах залегания их источников (первые сотни километров).

Выявленная на качественном уровне связь областей сейсмичности Земли с положительным градиентом геомагнитного поля для временного интервала 1950—2000 гг. [Орлюк и др., 2016а,б] подтверждается и в дальнейшем. На рис. 3 приведены области повышенной сейсмичности и градиента «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля для 1950—2015 гг., что в целом подтверждает выявленную закономерность. Естественно, что в этой закономерности есть исключение. В частности, в области Северной и Центральной Америки, а также Океании повышенная сейсмичность приурочена к областям отрицательного градиента магнитного поля или к зонам его повышенных градиентов.

Заметим, что наличие региональных магнитных аномалий с длиной волн 200—400, 500—700 и 1100—1300 км в пределах древних платформ, а также рифтов и островных дуг было отмечено давно [Кочергин и др., 1980; Колесова, 1985; Орлюк, 1991; Орлюк, Пашкевич, 1995, 2012]. Позже приуроченность длинноволновых аномалий близких классов к областям субдукции Тихоокеанского сейсмического пояса была показана в работах [Blakely et al., 2005; Purucker, Clark, 2011]. Следовательно, выявленные аномалии промежуточного класса с длинами волн в первые тысячи километров, отнесенные к зонам сочленения литосферных плит, позволяют поновому посмотреть на глубинное строение этих структур и рассмотреть возможные механизмы формирования их источников.

Качественный анализ прогнозируемых механизмов взаимосвязи сейсмичности и магнитное поле Земли. Выявленная зависимость между сейсмичностью Земли и вековым ходом «ядровой» и «мантийно-

литосферной» составляющих геомагнитного поля позволяют рассмотреть в первом приближении возможные механизмы их взаимосвязи. Прежде всего следует отметить достаточно хорошую пространственную совмещенность этих двух геофизических явлений, особенно для градиента «мантийно-литосферной» компоненты и сейсмичности зон сочленения литосферных плит. Это дает основание для анализа и предложения опосредованных или непосредственных механизмов такой взаимосвязи. В настоящее время опосредованная взаимосвязь сейсмичности Земли со структурой геомагнитного поля отмечена в работах [Khachikyan et al., 2012; Хачикян и др., 2013]. В этих публикациях показано, что география распределения на планете сейсмотектонических поясов связана с геометрией ее главного геомагнитного поля, а максимальная сейсмичность северного и южного ограничений литосферных плит приурочена к геомагнитным широтам с углом наклона вектора индукции $\pm(45—60)^\circ$. Естественно, что при этом можно говорить об опосредованной связи, обусловленной, возможно, разной прочностью пород в зависимости от направления вектора их намагниченности и соотношения с ним вектора поля напряжений. Поэтому стоит обратить внимание на связь очагов землетрясений с магнитными блоками земной коры или их границами, как показано на примере Сычуаньского землетрясения 20 апреля 2013 г. [Собисевич и др., 2014]. Объяснением этого может служить тот факт, что намагниченная порода обладает большей прочностью за счет взаимодействия магнитных минералов, и таким образом в пределах магнитных блоков возможно накопление больших напряжений по сравнению с их размагниченными частями. Максимальное накопление напряжений при этом возможно в интервале температур эффекта Гопкинсона вблизи температуры Кюри ферромагнетика, характеризующегося резким увеличением магнитной восприимчивости пород.

Более определенно можно говорить о предполагаемых механизмах взаимосвя-

зи «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля с сейсмичностью зон сочленения литосферных плит.

Рассмотрим один из них на примере субдукционных зон между Филиппинской и Евразийской, а также Тихоокеанской и Северо-Американской плитами. Эта область выделяется «мантийно-литосферной» аномалией северо-восточного простирания интенсивностью 150—220 нТл, которая возникла за 50 лет, т. е. прирост поля составляет 3,0—4,4 нТл/год. Она расположена над зоной субдукции западного и юго-западного падения, которая трассируется путем нарушения переходных зон на глубинах 410 и 660 км и характеризуется в глубинной части относительным снижением скорости продольных сейсмических волн на 0,4—0,8 км/с [Niu et al., 2005]. Такое снижение можно объяснить наличием коровых базальтов или железистых, возможно серпентинизированных, ультраосновных мантийных пород. Относительно методики интерпретации аномалий временных изменений геомагнитного поля, она рассматривалась как статическая. В дальнейшем задавалась модель источника намагниченности литосферы, рассчитанное магнитное поле которого соответствует данной аномалии. Полученные значения намагниченности нормировались на количество лет, т. е. вычислялся градиент за один год. Было рассчитано несколько эквивалентных моделей магнитных источников, расположенных на глубинах от 20 до 600 км с намагниченностью в пределах 0,3—1,0 А/м, соответствующих мантийно-литосферной аномалии. Это означает, что каждый год к источнику добавляются магнитные массы в пределах 0,006—0,02 А/м. Принципиально важной является возможность такого распределения намагниченности в литосфере и верхней мантии, которое соответствует интерпретируемой аномалии.

Не останавливаясь на модели токов, которая представляется маловероятной, так как трудно предложить механизм постоянного увеличения тока в такой относительно узкой вытянутой области верх-

ней мантии Земли на протяжении 65 лет, рассмотрим «магнитоминералогическую» природу полученной аномалии.

Для магнитоминералогического обеспечения предложенных моделей необходимо рассмотреть возможность и условия существования на глубинах магнитных минералов, которые могут создавать соответствующие магнитные аномалии. Согласно петромагнитной модели литосферы [Wasilewski, Warner, 1988; Петромагнитная..., 1994], в глубинных зонах земной коры и верхней мантии Земли есть несколько минералов, которые могут хранить магнитные свойства: магнетит Fe_3O_4 с температурой Кюри $T_C=585^\circ\text{C}$ (выше которой магнетит теряет магнитные свойства), гематит ($T_C=700^\circ\text{C}$) и самородное железо $\alpha\text{-Fe}$ ($T_C=760^\circ\text{C}$). Также могут присутствовать сплавы металлов, в частности железа и кобальта ($T_C=1121^\circ\text{C}$), железа и меди, а также железа и никеля ($T_C=358^\circ\text{C}$), которые образуются в высоковосстановительной среде. Каким же образом эти магнитные минералы могут быть на глубинах, полученных по результатам интерпретации? Поскольку аномалия расположена в зоне сочленения Евразийской с одной стороны и Филиппинской и Тихоокеанской плит с другой, то можно прогнозировать заталкивание (погружение) литосферы (вместе с океанической корой) под литосферу континентального типа. Такой вариант «субдукционного» типа сочленения этих плит вероятен согласно результатам сейсмографических исследований [Niu et al., 2005]. В связи с этим можно предложить «температурно-магнитный» механизм — погружение в верхнюю мантию высокомагнитной океанической коры (4—5 А/м), намагниченность которой обусловлена прежде всего магнетитом, гематитом и, предположительно, самородным железом [Орлюк, 1999, 2000; Kletetschka et al., 2002; Ishimaru et al., 2009; Dunlop et al., 2010; Ferre et al., 2014]. Согласно работе [Петромагнитная..., 1994], океаническая кора имеет незначительную мощность (8—15 км) с увеличением от срединно-океанических хребтов к зонам субдукции. В условиях

консервации термического режима этой части субдуцированной литосферы она может оставаться магнитной на протяжении сотен тысяч лет. Кроме того, за счет дегидратации субдуцируемой океанической коры происходит серпентинизация пород верхней мантии [Hyndman, Peacock, 2003; Blakely et al., 2005] с одновременным увеличением намагниченности за счет новообразования магнетита и, предположительно, самородного железа. Следовательно, в верхней мантии в областях субдукции происходит новообразование магнитных минералов за счет серпентинизации ультраосновных пород и сохранение намагниченности океанической коры за счет консервации термического режима погружаемых пород, т.е. в течение длительного времени на больших глубинах могут находиться намагниченные блоки земной коры. Изменение магнитного поля над ними обусловлено прогревом этих блоков и достижением по его краям температур, близких к температуре Кюри магнетита, гематита и самородного железа. Ниже температуры Кюри существует температурный интервал, в пределах которого магнитная восприимчивость (намагниченность) породы возрастает в несколько, а может, и в десятки раз (так называемый эффект Хопкинсона). Именно этот процесс может вызывать увеличение геомагнитного поля перед дальнейшим его существенным уменьшением (для случая прогрева всей толщи выше температуры Кюри имеющихся магнитных минералов). Итак, перемещения блоков океанической литосферы и прогрев до и выше температуры Кюри имеющихся магнитных минералов могут вызывать быстрые изменения «мантийно-литосферной» составляющей магнитного поля Земли. Полное преобразование пород погружаемой плиты, естественно, будет отмечаться уменьшением прироста магнитного поля, которым, вероятно, можно объяснить минимум «мантийно-литосферной» компоненты, расположенный западнее рассмотренного максимума. Не исключено, что такую же природу имеют и фокусы векового хода

с отрицательным градиентом. Во всяком случае, так можно проинтерпретировать отрицательный фокус векового хода в районе северо-запада Американского континента, который, по данным [Романюк и др., 2007], может быть обусловлен полным погружением и «сломом слэба» плиты Фараллон около 42 млн лет назад.

Для срединно-океанических хребтов предлагается «флюидогазово-магнитный» механизм накопления магнитных минералов в верхней мантии и литосфере. Для обоснования данного механизма может быть использована модель глубинного флюидного режима, имеющего в своей основе первично-восстановительный характер мигрирующих из мантии флюидов и газов, главными компонентами которых являются водород, окись кислорода и метан. Взаимодействие восстановительных флюидов с различными соединениями железа и горными породами может приводить к восстановлению самородного железа α -Fe [Орлюк, 1999; Лыкасов и др., 2013]. Идеализированно это можно записать следующим образом: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$. При этом в области низких давлений и температур ($P=1\div 10$ кбар, $T=600$ °C) устойчив парагетезит $Fe-Fe_3O_4$, а при высоких значениях появляется слабомагнитный вюстит — FeO [Лившиц и др., 1969]. Стоит также отметить, что предложенные трансформации соединений железа могут происходить в обратном направлении при изменении окислительно-восстановительного режима. Кроме такой перекристаллизации магнитных минералов за счет изменения окислительно-восстановительного режима возможно обогащение глубинных пород магнетитом и самородным железом за счет привнесения железа флюидом с низким рН. В настоящее время все больше как теоретических, так и экспериментальных доказательств приобретает гипотеза трансмантийных потоков газов и флюидов [Летников и др., 1977; Ларин, 1980; Гантимуров, 1982; Гуфельд и др., 1998; Лукин, 2009; Гуфельд, Матвеева, 2011; Орлюк, Пашкевич, 2012], за счет которых в верхней части мантии и литосфере Зем-

ли могут происходить приведенные выше трансформации магнитных минералов. Косвенным подтверждением трансформации магнитных минералов в особых тектонических зонах верхней мантии Земли могут служить результаты последних работ В. Семенова и М. Петрищева [Семенов, Петрищев, 2016; Semenov, Petrishchev, 2017], в которых показаны существенные временные изменения магнитной проницаемости пород на этих глубинах. Можно считать, что границы между литосферными плитами субдукционного, срединно-океанического и, возможно, коллизионного типов отражают зоны потоков восстановительных флюидов, а также предположить структурообразующую роль последних относительно современных структур и их динамики в зависимости от особенностей строения верхней мантии и литосферы.

Предложенные на качественном уровне возможные «магнитоминералогические» механизмы взаимосвязи сейсмичности Земли с динамикой «мантийно-литосферной» составляющей геомагнитного поля, а именно: погружение магнитных блоков литосферы в верхнюю мантию с последующими изменениями намагниченности за счет их прогрева и трансформации железистых минералов в магнитные или немагнитные разновидности под действием восстановительных флюидов и газов, конечно же, потребуют количественных оценок. Прежде всего необходима оценка типа и намагниченности коры, а также скорости ее погружения в мантию и расчет времени, необходимого для выравнивания температуры с мантийной. При этом особое внимание должно быть обращено на узкий интервал температур вблизи изотермы Кюри ферромагнитных минералов, в пределах которого происходит резкое увеличение магнитной восприимчивости магнетита и самородного железа [Логачев, 1968; Орлюк, 1999]. Такие же оценки необходимы и для второго механизма. Он представляется также весьма интересным и вероятным, так как приуроченность рассмотренной выше аномалии и к срединно-

океаническому хребту, и к зоне субдукции может быть проинтерпретирована изменениями намагниченности пород мантии и коры за счет глубинных флюидов и газов.

Выводы. 1. Выполнен анализ пространственно-временных изменений геомагнитного поля и сейсмичности для периода 1950—2015 гг. Для анализа использована 12-я модель Международного геомагнитного аналитического поля Земли $V_{IGRF-12}$ (2015—2020). Для определения временно-градiente модуля индукции ГМПЗ были созданы числовые массивы данных V_{IGRF} для периода 1950—2015 гг. по сети $1^\circ \times 1^\circ$ и интервалом в 5 лет. Вековой ход геомагнитного поля за этот период был разделен путем его осреднения на условно «ядровую» и «мантийно-литосферную» составляющие.

2. Для «ядровой» компоненты поля выделены три фокуса с отрицательным и два с положительным градиентом геомагнитного поля, характеризующиеся существенным западным дрейфом. Градиент поля в этих фокусах за 65 лет находился в пределах от -6600 до 2000 нТл (от -100 до 30 нТл/год). Для «мантийно-литосферной» компоненты выделено 12 фокусов с положительным и 10 с отрицательным градиентом поля. При этом за 65 лет большая часть фокусов не изменила своего местоположения, а градиент поля составил $175—490$ нТл ($2,5—7,5$ нТл/год) для положительных и $-(220—535)$ нТл ($-(3,4—8,2)$ нТл/год) для отрицательных величин.

3. Выявлена зависимость между сейсмичностью Земли и вековым ходом (временным градиентом) ее геомагнитного поля с 1950 по 2015 г. — повышенный приростом в целом для северо-восточной области, характеризующейся повышенной сейсмичностью, и пониженный отрица-

тельный градиент для юго-западной области Земли с пониженной сейсмичностью.

4. Установлена приуроченность полос и участков современной сейсмической активности к областям существенного прироста «мантийно-литосферной» компоненты магнитного поля Земли. В тектоническом плане они приурочены к разнотипным зонам сочленения литосферных плит.

5. Предложено два механизма такой связи: а) «температурно-магнитный», обусловленный погружением магнитных блоков океанической коры в зоне субдукции, с последующим изменением намагниченности за счет прогрева; б) «флюидогазово-магнитный», основанный на образовании и трансформации железистых минералов под влиянием трансмантийных газов и флюидов. Оба механизма позволяют впервые на уровне вещества и процессов в верхней мантии и литосфере зон сочленения литосферных плит объяснить на качественном уровне как сейсмичность, так и динамику «мантийно-литосферной» составляющей геомагнитного поля.

Благодарности. Авторы благодарны Институту геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины за возможность выполнения данного исследования за счет финансирования в рамках бюджетных тем № III-3-13 «Літосферні і зовнішні джерела геомагнітного поля території України: проблеми геологічної еволюції земної кори, рудо- та нафтогазоносності і екологічного стану доквілля» и № II-7-12 «Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від загрозливих явищ ендегенного походження на території України та Росії». Особую признательность выражаем проф. О. М. Русакову за полезные замечания и правки, существенно улучшившие статью.

Список литературы

Андреев Б. А. Геофизические методы в региональной и структурной геологии. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1960. 260 с.

Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 20—33.

- Гантимуrow А. А. Флюидный режим железо-кремниевых систем. Новосибирск: СО АН СССР, 1982. 106 с.
- Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. Москва: Наука, 2008. 295 с.
- Гульельми А. В., Зотов О. Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями. *Физика Земли*. 2012. № 2. С. 84—87.
- Гуфельд И. Л. Гусев Г. А., Матвеева М. И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов. *Докл. АН*. 1998. Т. 365. № 5. С. 677—680.
- Гуфельд И. Л., Матвеева М. И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры. *Докл. РАН*. 2011. Т. 438. № 2. С. 253—257.
- Колесова В. И. Аналитические методы магнитной картографии. Москва: Наука, 1985. 224 с.
- Кочергин Е. В., Павлов Ю. А., Сергеев К. Ф. Геомагнитные аномалии Курильской и Рюкю островных систем. Москва: Наука, 1980. 127 с.
- Кузнецова В. Г., Максимчук В. Ю., Городиский Ю. М., Никіфорова Н. М., Пронишин Р. С. Дослідження зв'язків сейсмічності Карпат з фазами 11-річного циклу сонячної активності і магнітними бурями з раптовим початком. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 5. С. 849—856.
- Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. Москва: Недра, 1980. 216 с.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ОНФЗ РАН, 1995. 36 с.
- Летников Ф. А., Карпов И. К., Киселев А. И., Шкандрий Б. О. Флюидный режим земной коры и верхней мантии. Москва: Наука, 1977. 216 с.
- Лившиц Л. Д., Печерский Д. М., Трухин В. И. Эффект роста остаточной намагниченности при нагревании вюститита. В кн.: *Магнетизм горных пород и палеомагнетизм*. Москва: ИФЗ АН СССР, 1969. С. 13—15.
- Логачев А. А. Магниторазведка. Ленинград: Недра, 1968. 296 с.
- Лыкасов А. А., Рысс Г. М., Власова И. С. Фазовые превращения при восстановлении шлака сульфидной медной плавки продуктами газификации углеродистых восстановителей при температуре 1320 К. *Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия»*. 2013. Т. 13. № 1. С. 24—28.
- Лукин А. Е. Самородно-металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазовых бассейнов — трассеры суперглубинных флюидов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 61—92.
- Оль А. И. Вековой ход магнитного поля и сейсмичность Земли. *Природа*. 1949. № 12. С. 6—14.
- Орлюк М. І. Магнітна модель земної кори південного заходу Східноєвропейської платформи: Дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 1999. 404 с.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 148—165.
- Орлюк М. І. Теоретичні магнітні моделі континентальних рифтів. *Доп. АН УРСР*. 1991. № 8. С. 115—119.
- Орлюк М. І. Марченко А. В., Роменець А. О. Сейсмічність Землі та вікові зміни її головного магнітного поля. *Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища: Матеріали VI Міжнар. наук. конф.* Львів, 2016а. С. 202—204.
- Орлюк М., Марченко А., Роменець А. Зв'язок сейсмічності Землі та вікових змін її магнітного поля. *Вісник Київського національного університету. Геологія*. 2016б. № 75(4). С. 50—54.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с трансформными разломами. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 224—234.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Магнитная модель юго-западного края Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 1995. Т. 17. № 6. С. 31—36.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Теоретические

- магнитные модели континентальных палеорифтов и островных дуг. *Геофиз. журн.* 1993. Т. 15. № 5. С. 32—41.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Новый критерий оценки пространственно-временной возмущенности магнитного поля Земли и некоторые аспекты его использования. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 1012—1023.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Структура и динамика главного магнитного поля Земли на ее поверхности и в ближнем космосе. *Odessa astronomical publications.* 2011. Т. 24. С. 124—129.
- Романюк Т. В., Ребецкий Ю. Л., Михайлов А. В. Кайнозойская геодинамическая эволюция и тектонофизическая модель Каскадной субдукционной зоны (северо-западная окраина Северной Америки). *Бюл. МОИП. Отг. геол.* 2007. Т. 82. Вып. 5. С. 19—40.
- Русаков О. М. Магнитное поле Земли в мезозое. Киев: Наук. думка, 1969. 146 с.
- Пашкевич И. К., Мозговая А. П., Орлюк М. И. Объемная магнитная модель Крыма и сопредельных регионов применительно к сейсмическому районированию. В кн.: *Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины.* Киев: Наук. думка, 1993. С. 9—18.
- Петрова Г. Н. Вековые вариации и граница ядро-мантия. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. В кн.: *Геоманнитные исследования.* № 17. Москва: Наука, 1976. С. 15—21.
- Петромагнитная модель литосферы. Ред. Д. М. Печерский. Киев: Наук. думка, 1994. 175 с.
- Почтарев В. И. Нормальное магнитное поле Земли. Москва: Наука, 1983. 268 с.
- Симоненко Т. Н. Строение магнитоактивной оболочки континента. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. В кн.: *Геоманнитные исследования.* № 17. Москва: Наука, 1976. С. 53—58.
- Семенов В., Петришев М. Годовые вариации сопротивления Земли и их связь с тектоническими зонами в Евразии. *Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища: Матеріали VI Міжнар. наук. конф.* Львів, 2016. С. 259—260.
- Сергеева Н. Г., Оглоблина О. Ф., Черняков С. М. Сильные землетрясения и их влияние на полярную нижнюю ионосферу. *Вестник МГТУ.* 2009. № 2(12). С. 328—337.
- Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Собисевич А. Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений. *Докл. АН.* 2010. Т. 435. № 4. С. 548—553.
- Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Собисевич А. Л., Мисеюк О. И. Геомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли на этапах подготовки и развития Турецкого (08.03.2010 г.) и Северокавказского (19.01.2011 г.) землетрясений. *Докл. АН.* 2013а. Т. 449. № 1. С. 93—96.
- Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониди К. Х. Аномальные геомагнитные возмущения, наведенные катастрофическими цунамигенными землетрясениями в районе Индонезии. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 22—37.
- Собисевич А. Л., Старостенко В. И., Собисевич Л. Е., Кендзера А. В., Шуман В. Н., Вольфман Ю. М., Потемка Э. П., Канониди К. Х., Гарифулин В. А. Черноморские землетрясения конца декабря 2012 г. и их проявление в геомагнитном поле. *Геофиз. журн.* 2013б. Т. 35. № 6. С. 54—71.
- Собисевич А. Л., Рогожин Е. А., Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Кендзера А. В., Марченко А. В., Орлюк М. И. Возмущения геомагнитного поля при Сычуаньском землетрясении 20 апреля 2013 г. (Ms=7.0). *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 37—49.
- Хачикян Г. Я., Жакупов Н. С., Кадырханова Н. Ж. Геомагнитная сопряженность современных тектонических структур. *Геодинамика и тектонофизика.* 2013. Т. 4. № 2. С. 187—195.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 2. С. 4—19.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: новые экспериментальные результаты и анализ проблемы. *Геоінформатика.* 2010. № 4. С. 79—93. <http://dsp.space.nbuv.gov.ua/handle/123456789/95758>.

- Щербина С. В. Корреляционный анализ связи динамики солнечной плазмы и процесса генерации землетрясений. *Геодинамика*. 2013. № 2(15). С. 370—372.
- Ягогин А. П. КаУ-волна предупреждает землетрясение. Хайфа: Akavish, 2015. 78 с.
- Blakely B., Brocher T., Wells R., 2005. Subduction — zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geology* 33(6), 445—448. doi 10.1130/G21447.1.
- Dunlop D., Ozdemir O., Costanzo-Alvarez V., 2010. Magnetic properties of rocks of the Kapuskasing uplift (Ontario, Canada) and origin- of long-wavelength magnetic anomalies. *Geophys. J. Int.* (183), 645—658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04778.x>.
- Fedorova N. V., Shapiro V. A., 1998. Reference field for the airborne magnetic data. *Earth Planet. Space* 50, 397—404.
- Ferré E., Friedman S. A., Martín-Hernández F., Feinberg J. M., Till J. L., Ionov D. A., Conder J. A., 2014. Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic. *Tectonophysics* 624-625, 3—14. doi 10.1016/j.tecto.2014.01.004.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L., 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planet. Space* 68:112. doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Ishimaru S., Arai S., Shukuno H., 2009. Metal-saturated peridotite in the mantle wedge inferred from metal-bearing peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284(3-4), 352—360. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.042>.
- Hyndman R. D., Peacock S. M., 2003. Serpentinization of the forearc mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 417—432. doi:10.1016/S0012-821X(03)00263-2.
- Khachikyan G., Inchin A., Lozbin A., 2012. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system. *Int. J. Geosci.* 3(5), 1084—1088. doi: 10.4236/ijg.2012.35109.
- Kletetschka G., Wasilewski P., Taylor P., 2002. The role of hematite-ilmenite solid solution in the production of magnetic anomalies in ground- and satellite-based data. *Tectonophysics* 347(1-3), 167—177.
- Mandea M., Korte M. (eds.), 2011. Geomagnetic Observations and Models. IAGA Special Sopron Book Series; Vol. 5. 343 p. doi: <http://doi.org/10.1007/978-90—481-9858-0>.
- Mavrodiev S., Pekevski L., Kikuashvili G., Botev E., Getsov P., Mardirossian G., Sotirov G., Teodossiev D., 2015. On the Imminent Regional Seismic Activity Forecasting Using INTERMAGNET and Sun-Moon Tide Code Data. *Open Journal of Earthquake Research* (4), 102—113. doi: 10.4236/ojer.2015.43010.
- Niu F., Levander A., Ham S., Obayashi M., 2005. Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi-net receiver functions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 239, 9—17. doi:10.1016/j.epsl.2005.08.009.
- Pashkevich I. K., Orlyuk M. I., 1997. Magnetic model of the lithosphere and some problems of Geomagnetic Reference Field. Abstracts, 8th Scientific Assembly of IAGA, Uppsala. P. 485.
- Purucker M. E., Clark D. A., 2011. Mapping and interpretation of the Lithospheric Magnetic Field. In: M. Mandea, M. Korte (eds.). *Geomagnetic Observations and Models*. IAGA Special Sopron Book Series Vol. 5, P. 311—337. doi: 10.1007/978-90—481-9858-0.
- Purucker M., Whaler W., 2007. Crustal magnetism, in Geomagnetism. In: M. Kono. (ed.). *Treatise on Geophysics*. Vol. 5. Ch. 6. Amsterdam: Elsevier, P. 195—237.
- Semenov V., Petrishchev M., 2017. Induction Sounding of the Earth's Mantle. Springer International Publishing AG. 100 p. doi: 10.1007/978-3-319-53795-5.
- Thébault E., Finlay C. C., Beggan C. D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J. M., Lesur V., Lowes F. J., 2015. Special issue «International Geomagnetic Reference Field — the twelfth generation». *Earth Planet. Space* 67:79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0313-0>

- Thébault E., Purucker M., Whaler K. A., Langlais B., Sabaka T. J.*, 2010. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. *Space Sci. Rev.* 155(1-4), 95—127. doi: 10.1007/s11214-010—9667-6.
- Wasilewski P. J., Warner R. D.*, 1988. Magnetic petrology of deep crustal rocks — Ivrea Zone, Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 87(3), 347—361. doi: 10.1016/0012-821X(88)90022-2.

Spatial-temporal changes in the geomagnetic field and seismicity

© M. I. Orlyuk, A. V. Marchenko, A. A. Romenets, 2017

This paper presents the results of an analysis of spatial-temporal changes in the Earth's magnetic field and its seismicity for the period 1950—2015. The International Geomagnetic Field of the 12 generation ($B_{IGRF-12}$) was analyzed. This model allows one to study the characteristic features of magnetic anomalies with dimensions of the first thousands of kilometers. To determine the temporal changes in the geomagnetic field (dB/dt), digital datasets of B_{IGRF} were developed for the period 1950—2015 in a $1^\circ \times 1^\circ$ grid and for an interval of 5 years. Temporal changes were divided into the virtual long-wave core-generated and short-wave mantle-lithospheric — generated components. There were revealed 2 negative and 3 positive foci of the core-generated component. For the 65 y period the component changes in these foci range from –6600 to 2000 nT (from –100 to 30 nT/y), the foci being characterized by the significant westward drift. 12 positive and 10 negative foci were delineated in the mantle-lithospheric-caused component. During 65 years most of the foci do not change their location. The changes in magnitude of positive and negative foci are 175—490 nT, (2,5—7,5 nT/y) and –(220—535) nT, (–(3,4—8,2) nT/y) respectively. In the southwestern domain of the Earth the intensity of seismicity is lower and the core-originated component is significantly decreased in comparison with the northwestern domain. The relationship is observed between areas of increased seismic activity, foci of the mantle-lithospheric component of the geomagnetic field and areas of its positive increase, which tectonically correspond to the junction zones of lithospheric plates of the «subduction», «collision» and «mid-ocean-rift» types. On the basis of the regularities revealed, two mechanisms of such an association are proposed: a) «temperature-magnetic», caused by descending the magnetic blocks of the oceanic crust in a subduction zone and also serpentinization of ultrabasic rocks of the upper mantle; b) «fluid-gas-magnetic», based on the formation and transformation of ferruginous minerals under the influence of the mantle gases and fluids. The magnetic blocks of the Earth's lithosphere are more solid than those of the non-magnetic. Therefore, within the blocks, as well as on their margins, the accumulation of large stresses is possible and, consequently, the preconditions are created for the formation of earthquake foci.

Key words: geomagnetic field, seismicity, lithospheric plates, magnetization, deep fluids.

References

- Andreev B. A.*, 1960. Geophysical methods in regional and structural geology. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Conservation of Subsoil, 260 p. (in Russian).
- Bogdanov Yu. A., Pavlovich V. N., Shuman V. N.*, 2009. Spontaneous electromagnetic emission of the lithosphere: the state of the problem and mathematic models. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(4), 20—33 (in Russian).
- Gantimurov A. A.*, 1982. Fluid regime of iron-silicon systems. Novosibirsk: Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 106 p. (in Russian).
- Gokhberg M. B., Shalimov S. L.*, 2008. The impact of

- earthquakes and explosions on the ionosphere. Moscow: Nauka, 295 p. (in Russian).
- Gulyelmi A. V., Zotov O. D., 2012. About magnetic disturbances before strong earthquakes. *Fizika Zemli* (2), 84—87 (in Russian).
- Gufeld I. L., Gusev G. A., Matveeva M. I., 1998. Metastability of the lithosphere as a manifestation of the ascending diffusion of light gases. *Doklady AN* 365(5), 677—680 (in Russian).
- Gulfeld I. L., Matveeva M. I., 2011. The barrier effect of degassing and destruction of the Earth's crust. *Doklady RAN* 438(2), 253—257 (in Russian).
- Kolesova V. I., 1985. Analytical methods of magnetic cartography. Moscow: Nauka, 224 p. (in Russian).
- Kochergin E. V., Pavlov Yu. A., Sergeev K. F., 1980. Geomagnetic anomalies of the Kurile and Ryukyu island systems. Moscow: Nauka, 127 p. (in Russian).
- Kuznetsova V. G., Maksymchuk V. Yu., Gorodyskyy Yu. M., Nikiforova N. M., Pronyshyn R. S., 2005. Investigation of seismicity of the Carpathians with phases of the 11-year cycle of solar activity and magnetic storms with a sudden start. *Geofizicheskiy zhurnal* 27(5), 849—856 (in Ukrainian).
- Larin V. N., 1980. The hypothesis of the initially hydride Earth. Moscow: Nedra, 216 p. (in Russian).
- Levshenko V. T., 1995. Ultra-low-frequency electromagnetic signals of lithospheric origin: Author's abstract. dis. Dr. phys. and math. sci. Moscow: IPE RAS, 36 p. (in Russian).
- Letnikov F. A., Karpov I. K., Kiselev A. I., Shkandriy B. O., 1977. The fluid regime of the earth's crust and upper mantle. Moscow: Nauka, 216 p. (in Russian).
- Livshits L. D., Pecherskiy D. M., Trukhin V. I., 1969. The effect of growth of residual magnetization upon heating of wustite. In: Magnetism of rocks and paleomagnetism. Moscow: IPE Academy of Sciences of the USSR, P. 13—15 (in Russian).
- Logachev A. A., 1968. Magnetic prospecting. Leningrad: Nedra, 296 p. (in Russian).
- Lykasov A. A., Riss G. M., Vlasova I. S., 2013. Phase transformations during reduction of slag of sulfide copper melting by products of gasification of carbonaceous reductants at 1320 K. *Vestnik SUSU. Ser. «Metallurgy»* 13(1), 24—28 (in Russian).
- Lukin A. E., 2009. Native-metallic micro- and nano-inclusions in formations of oil and gas-bearing basins as tracers of super-deep fluids. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(2), 61—92 (in Russian).
- OIA. I., 1949. Century course of the magnetic field and seismicity of the Earth. *Priroda* (12), 6—14 (in Russian).
- Orlyuk M. I., 1999. Magnetic model of the earth's crust of the south-west of the East European platform: Dis. Dr. geol. sci. Kyiv, 404 p. (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., 2000. Spatial and spatial-temporal magnetic models of different-structure structures of the continental type lithosphere. *Geofizicheskiy zhurnal* 22(6), 148—165 (in Russian).
- Orlyuk M. I., 1991. Theoretical magnetic models of continental rifts. *Dopovidi AN URSR* (8), 115—119 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A. V., Romanets A. O., 2016a. Seismicity of the Earth and age changes of its main magnetic field. *Geophysical technology forecasting and monitoring of the geological environment: Proc. of the VI Int. Conf.* Lviv, P. 202—204 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A., Romanets A., 2016b. Relationship of earth's seismicity and age changes in its magnetic field. *Visnyk Kyyivskoho natsionalnoho universytetu. Heolohiya* (75), 50—54 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 2012. Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation with transcrustal faults. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 224—234 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 1995. Magnetic model of the southwestern edge of the East European platform. *Geofizicheskiy zhurnal* 17(6), 31—36 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 1993. Theoretical magnetic models of continental paleorifts and island arcs. *Geofizicheskiy zhurnal* 15(5), 32—41 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Romanets A. A., 2005. New criterion

- for estimating the spatiotemporal perturbation of the Earth's magnetic field and some aspects of its use *Geofizicheskiy zhurnal* 27(6), 1012—1023 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Romenets A. A., 2011. Structure and dynamics of the Earth's main magnetic field on its surface and in near space. *Odessa astronomical publications* 24, 124—129 (in Russian).
- Romanyuk T. V., Rebetskiy Yu. L., Mikhaylov A. V., 2007. Cenozoic geodynamic evolution and tectonophysical model of the Cascade subduction zone (north-western margin of North America). *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytatelye prirody. Otdel geologicheskii* 82(5), 19—40 (in Russian).
- Rusakov O. M., 1969. Magnetic field of the Earth in the Mesozoic. Kiev: Naukova Dumka, 146 p. (in Russian).
- Pashkevich I. K., Mozgovaya A. P., Orlyuk M. I., 1993. Volumetric magnetic model of Crimea and adjacent regions with reference to seismic zoning. In: *Geodynamics and deep structure of seismogenic zones of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, P. 9—18 (in Russian).
- Petrova G. N., 1976. Century variations and the core-mantle boundary. Results of studies on international geophysical projects. In: *Geomagnetic studies*. No 17. Moscow: Nauka, P. 15—21 (in Russian).
- Petromagnetic model of the lithosphere, 1994. Ed. D. M. Pecherskiy. Kiev: Naukova Dumka, 175 p. (in Russian).
- Pochtarev V. I., 1983. Normal magnetic field of the Earth. Moscow: Nauka, 268 p. (in Russian).
- Simonenko T. N., 1976. The structure of the magnetoactive shell of the continent. Results of studies on international geophysical projects. In: *Geomagnetic studies*. No 17. Moscow: Nauka, P. 53—58 (in Russian).
- Semenov V., Petrishchev M., 2016. Annual variations of the Earth's resistance and their connection with tectonic zones in Eurasia. *Geophysical technology forecasting and monitoring of the geological environment: Proc. of the VI Int. Conf.* Lviv, P. 259—260 (in Russian).
- Sergeeva N. G., Ogloblina O. F., Chernyakov S. M., 2009. Strong earthquakes and their influence on the polar lower ionosphere. *Vestnik MGTU* (2), 328—337 (in Russian).
- Sobisevich L. Ye., Kanonidi K. Kh., Sobisevich A. L., 2010. Observations of ULF geomagnetic disturbances, reflecting the processes of preparation and development of tsunamigenic earthquakes. *Doklady AN* 435(4), 548—553 (in Russian).
- Sobisevich L. Ye., Kanonidi K. Kh., Sobisevich A. L., Miseyuk O. I., 2013a. Geomagnetic disturbances in variations of the Earth's magnetic field at the stages of preparation and development of Turkish (08.03.2010) and North Caucasian (19.01.2011) earthquakes. *Doklady AN* 449(1), 93—96 (in Russian).
- Sobisevich L. Ye., Sobisevich A. L., Kanonidi K. Kh., 2012. Anomalous geomagnetic disturbances induced by catastrophic tsunamigenic earthquakes in the region of Indonesia. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(5), 22—37 (in Russian).
- Sobisevich A. L., Starostenko V. I., Sobisevich L. Ye., Kendzera A. V., Shuman V. N., Volfman Yu. M., Potemka E. P., Kanonidi K. Kh., Garifulin V. A., 2013b. The Black Sea earthquakes of late December 2012 and their manifestation in the geomagnetic field. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(6), 54—71 (in Russian).
- Sobisevich A. L., Rogozhin Ye. A., Sobisevich L. Ye., Kanonidi K. Kh., Kendzera A. V., Marchenko A. V., Orlyuk M. I., 2014. Perturbations of the geomagnetic field in the Sichuan earthquake 20 April 2013 (Ms = 7.0). *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 37—49 (in Russian).
- Khachikyan G. Ya., Zhakupov N. S., Kadyrkhanova N. Zh., 2013. Geomagnetic conjugation of modern tectonic structures. *Geodinamika i tektonofizika* 4(2), 187—195 (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electromagnetic emission of the lithosphere: do we always adequately interpret what we know about as? *Geofizicheskiy zhurnal* 34(2), 4—19 (in Russian).
- Shuman V. N., 2010. Electromagnetic emission of the lithosphere: new experimental results and analysis of the problem. *Geoinformatika* (4), 79—93 (in Russian). <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/95758>.
- Shcherbina S. V., 2013. Correlation analysis of the connection between the dynamics of solar plasma and the process of earthquake generation. *Geodinamika* (2), 370—372 (in Russian).
- Yagodin A. P., 2015. The KaY-wave prevents an earthquake. Haifa: Akavish, 78 p. (in Russian).
- Blakely B., Brocher T., Wells R., 2005. Subduction

- zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geology* 33(6), 445—448. doi 10.1130/G21447.1.
- Dunlop D., Ozdemir O., Costanzo-Alvarez V., 2010. Magnetic properties of rocks of the Kapuskasing uplift (Ontario, Canada) and origin of long-wavelength magnetic anomalies. *Geophys. J. Int.* (183), 645—658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04778.x>.
- Fedorova N. V., Shapiro V. A., 1998. Reference field for the airborne magnetic data. *Earth Planet. Space* 50, 397—404.
- Ferré E., Friedman S. A., Martín-Hernández F., Feinberg J. M., Till J. L., Ionov D. A., Conder J. A., 2014. Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic. *Tectonophysics* 624-625, 3—14. doi 10.1016/j.tecto.2014.01.004.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L., 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planet. Space* 68:112. doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Ishimaru S., Arai S., Shukuno H., 2009. Metal-saturated peridotite in the mantle wedge inferred from metal-bearing peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284(3-4), 352—360. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.042>.
- Hyndman R. D., Peacock S. M., 2003. Serpentinization of the forearc mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 417—432. doi:10.1016/S0012-821X(03)00263-2.
- Khachikyan G., Inchin A., Lozbin A., 2012. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system. *Int. J. Geosci.* 3(5), 1084—1088. doi: 10.4236/ijg.2012.35109.
- Kletetschka G., Wasilewski P., Taylor P., 2002. The role of hematite-ilmenite solid solution in the production of magnetic anomalies in ground- and satellite-based data. *Tectonophysics* 347(1-3), 167—177.
- Mandea M., Korte M. (eds.), 2011. Geomagnetic Observations and Models. IAGA Special Sopron Book Series; Vol. 5. 343 p. doi: <http://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0>.
- Mavrodiev S., Pekevski L., Kikuashvili G., Botev E., Getsov P., Mardrossian G., Sotirov G., Teodossiev D., 2015. On the Imminent Regional Seismic Activity Forecasting Using INTERMAGNET and Sun-Moon Tide Code Data. *Open Journal of Earthquake Research* (4), 102—113. doi: 10.4236/ojer.2015.43010.
- Niu F., Levander A., Ham S., Obayashi M., 2005. Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi-net receiver functions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 239, 9—17. doi:10.1016/j.epsl.2005.08.009.
- Pashkevich I. K., Orlyuk M. I., 1997. Magnetic model of the lithosphere and some problems of Geomagnetic Reference Field. Abstracts, 8th Scientific Assembly of IAGA, Uppsala. P. 485.
- Purucker M. E., Clark D. A., 2011. Mapping and interpretation of the Lithospheric Magnetic Field. In: M. Mandea, M. Korte (eds.). *Geomagnetic Observations and Models*. IAGA Special Sopron Book Series Vol. 5, P. 311—337. doi: 10.1007/978-90-481-9858-0.
- Purucker M., Whaler W., 2007. Crustal magnetism, in Geomagnetism. In: M. Kono. (ed.). *Treatise on Geophysics*. Vol. 5. Ch. 6. Amsterdam: Elsevier, P. 195—237.
- Semenov V., Petrishchev M., 2017. Induction Sounding of the Earth's Mantle. Springer International Publishing AG. 100 p. doi: 10.1007/978-3-319-53795-5.
- Thébault E., Finlay C. C., Beggan C. D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lallanne X., Langlais B., Léger J. M., Lesur V., Lowes F. J., 2015. Special issue «International Geomagnetic Reference Field — the twelfth generation». *Earth Planet. Space* 67:79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0313-0>
- Thébault E., Purucker M., Whaler K. A., Langlais B., Sabaka T. J., 2010. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. *Space Sci. Rev.* 155(1-4), 95—127. doi: 10.1007/s11214-010-9667-6.
- Wasilewski P. J., Warner R. D., 1988. Magnetic petrology of deep crustal rocks — Ivrea Zone, Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 87(3), 347—361. doi: 10.1016/0012-821X(88)90022-2.