

## ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗВИТИЯ ВУЛКАНОПЛУТОНИЧЕСКИХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОКРАИН ТИХОГО ОКЕАНА

**В.Н. Шарапов, А.С. Лапухов, Л.Г. Смолянинова**

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптога, 3, Россия*

Комплексная статистическая обработка более 1000 дат развития рудно-магматических систем (РМС) и сопряженных с ними вулканоплутонических месторождений (ВПМ) окраин Тихого океана показала, что: 1) рудно-магматические системы вулканических дуг генерировали моно- и полициклические ВПМ с существенно различающимися длительностями формирования; 2) главной особенностью хроноструктуры РМС является периодичность их развития на постпалеозойском отрезке геологической истории континентальных окраин Тихого океана; 3) временные ряды РМС разных секторов окраин Тихого океана обладают подобием периодичностей, но различаются фазами и амплитудами проявлений металлогенических эпох на одинаковых отрезках временных линеек, что особенно заметно в последние 30 млн лет; 4) разные металлогенические ВПМ обладают собственной периодичностью; 5) периодичность длительностей формирования моно- и полициклических ВПМ отличается от периодичности появления ВПМ.

*Вулканоплутонические месторождения, рудоносные магматические комплексы, длительность, периодичность, окраины Тихого океана.*

## TIME PATTERNS OF MAGMATIC ORE SYSTEMS IN CIRCUM-PACIFIC VOLCANOPLUTONIC BELTS

**V.N. Sharapov, A.S. Lapukhov, and L.G. Smolyaninova**

Integrate statistical processing of more than 1000 isotope dates tracing the history of circum-Pacific magmatic ore systems and related mineral deposits in volcanoplutonic belts allows the following inferences: (1) magmatic ore systems (MOS) of volcanic arcs generate mono- and polycyclic volcanoplutonic deposits (VPD) with notably different formation times (longevities); (2) the MOS chronology bears periodicity of events in the post-Paleozoic history of the Pacific continental margin; (3) the time series of magmatic ore systems from different circum-Pacific segments show quasi-periodic patterns, but the respective metallogenic epochs within the same time intervals have different phases and amplitudes, especially over the past 30 Myr; (4) each mineral type of VPD has its own periodicity; (5) the periodicity in formation times of mono- and polycyclic VPD differs from that in the times of their origin.

*Volcanoplutonic deposits, ore-bearing igneous complexes, longevity, periodicity, Pacific margins*

## ВВЕДЕНИЕ

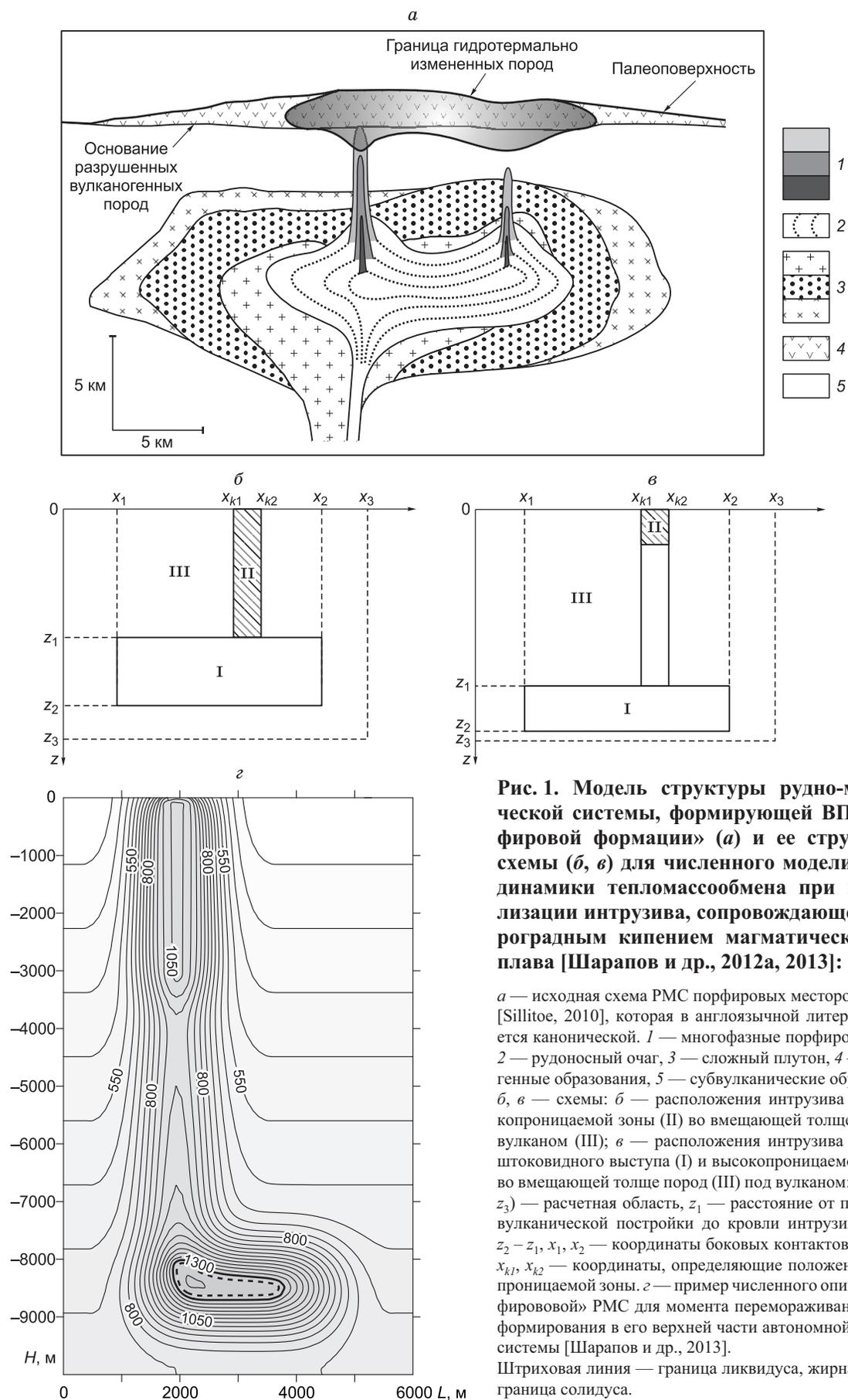
Генезис вулканоплутонических месторождений (ВПМ) эпиконтинентальных вулканических поясов северо-западного, северного и северо-восточного обрамления Тихого океана и западных океанических окраин Южной Америки является предметом интенсивных исследований с середины прошлого столетия. Обобщения данных о металлогении и тектоники этих окраин Тихого океана [Dynamic..., 2001; Cooke et al., 2005; Groves et al., 2005, 2010; Геодинамика..., 2006] и Южной Америки [Mamani et al., 2008, 2010] детализировали сведения о циклическом и пространным развитии вулканических дуг на протяжении последних 250 млн лет и характеристиках возникших в них месторождений поли-, благородных и редких металлов [Singer et al., 2005; Sinclair, 2008]. Главной особенностью этих исследований последних трех десятилетий, наряду с массовым изучением состава включений в минералах околорудных пород, по-видимому, можно считать накопление преимущественно в англоязычных публикациях численной информации о датах магматических и рудообразующих процессов. В русскоязычной литературе качественные толкования эпох вулканоплутонического рудообразования [Шило и др., 1992] приобрело количественные очертания в форме временных максимумов эндогенного рудообразования на окраинах Тихого океана: 2—5, 30, 60, 110 млн лет [Добрецов, 1994]. Второй особенностью изучения генезиса рудообразующих процессов активных окраин Тихого океана стало расхождение векторов рассмотрения деталей формирования ВПМ в отношении металлогенических типов

рудообразующих систем и их структурно-динамических характеристик в русско- и англоязычных публикациях. Так, по принятой в русскоязычной металлогенической литературе разными исследователями данные месторождения в классификациях относятся к различным формационным «группам», «рядам» [Сотников, 2006; Сидоров и др., 2011]. При этом формирование отдельных месторождений толкуется как моно- или полихронные, а в некоторых случаях и полигенные объекты [Модельный анализ..., 2009].

В современной англоязычной литературе принято различать высоко- и низкосульфидизированные области рудоотложения в рамках единой «порфировой формации» [Pirajno, 2009]. Такое объединение различных по металлогении объектов, похоже, произошло в связи с тем, что подавляющее большинство сформировавших их вулканоплутонических рудно-магматических флюидных систем вне зависимости от данного показателя оказались сходными в отношении структурно-динамических характеристик областей развития зон рудоотложения, а флюидные процессы были аналогичны по соотношениям с формами интродирования предрудных магм. Отметим, что задолго до этого разделения отмеченных векторов описания одних и тех же объектов была разработана [Поспелов, 1962] формализованная структурно-динамическая трактовка (в том числе и обсуждаемого) типов эндогенных рудообразующих флюидных систем. Такой подход в понимании развития тепломассопереноса в магматогенных рудообразующих системах позволил перейти от качественных генетических схем плутоногенных месторождений [Овчинников, 1988] к созданию обобщенной количественной модели коровых ортомагматических флюидных систем [Шарапов, Аверкин, 1990]. Дальнейшее развитие динамического анализа магматогенных рудообразующих систем привело к постановке и реализации задачи количественного описания динамики мантийно-коровых рудообразующих систем (МКРС) [Модельный анализ..., 2009]. В развитых количественных моделях МКРС удастся подойти к постановке и решению задач, относящихся к качественным схемам формирования месторождений «порфировой формации» [Sillitoe, 2010; Richards, 2011]. Их конкретизацию в отношении структурно-динамической схемы, принятой в англоязычной литературе [Pirajno, 2009], можно соотнести с генетическими разработками в отношении формирования плутоногенных [Овчинников, 1988] и вулканоплутоногенных [Шило и др., 1992] рудообразующих систем (ВПРС). Это достигается формализованным описанием динамики этих сходных по сути, но развивавшихся независимо генетических конструкций в математических 2D моделях (рис. 1): 1) сосредоточенного стока магматогенных флюидов в проницаемые зоны, «дренирующие» поток магматических флюидов, отделяющихся при ретроградном кипении магм в малоглубинных интрузивных камерах под вулканами [Шарапов и др., 2012a]; 2) проявления даек (штоков), в которых протекает ретроградное кипение магм над материнской магматической камерой [Шарапов и др., 2013]. Следующим математическим приближением для количественного моделирования динамики ВПМ должен стать учет в численных моделях металлогенической специализации материнских расплавов, приводящей к генерации формационных рядов ВПМ [Сотников, 2006; Сидоров и др., 2011]. При этом необходимо иметь в виду возможность появления в них структурно-динамических модификаций, возникающих из-за структурных условий развития флюидных систем в проницаемых зонах земной коры и специфики строения субаэральных вулканических сооружений, вмещающих зоны разгрузки гидротермальных растворов [Шарапов и др., 2012b]. Очевидно, что оконтуренная в цитированных работах простейшая одноактная (моногенная) динамическая модель вулканоплутонической рудообразующей системы (см. рис. 1) позволяет описать направленность развития лишь части реальных рудообразующих систем. Действительно, показано [Пономарчук, 2005; Сотников, 2006; Sillitoe, Martensen, 2010], что в одной проницаемой области земной коры такие системы возникали многократно с перерывами от сотен тысяч до десятков миллионов лет. Правдоподобность создаваемых количественных моделей динамики ВПМ необходимо верифицировать числовыми данными временных характеристик их формирования. Хотя выполнены обобщения количественных характеристик стадийности развития ВПМ с использованием наиболее точных из существующих методик [Sillitoe, Martensen, 2010], статистической систематики таких данных нам неизвестно. Поэтому в данном сообщении содержится попытка статистического анализа известных баз данных временных характеристик процессов формирования ВПМ активных окраин Тихого океана.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ числовой информации при изучении длительности и цикличности образования и эволюции ВПМ может базироваться на: 1) структурно-геологическом анализе (соотношение границ геологических тел и интерпретации последовательности их появления) [Кривцов и др., 1986; Геодинамика..., 2006; Pirajno, 2009; Sillitoe, 2010; и др.], 2) статистическом анализе численных данных «абсолютного» датирования времени появления магматических тел и сопряженных с ними рудных месторождений [Mediterrian..., 1999; Singer et al., 2005a,b; Mamani et al., 2008, 2010; Sinclair, 2008; и др.]. Первые позволяют судить о направлении развития стадий процесса, но ничего не говорят о величинах временных



отсечек на шкалах времени, тогда как вторые позволяют установить с некоторой инструментальной погрешностью даты появления минералов или пород в этих телах, для которых проведен геологический анализ [Интерпретация..., 2001]. Если с этой точки зрения рассмотреть известную статистику оценок времен развития отдельных стадий на конкретных месторождениях разного возраста, то следует отметить обширный список изученных месторождений, даты формирования части которых определены (по обработанной нами статистике более 800 дат). При этом получено весьма ограниченное число оценок продолжительности стадий формирования руд для этих объектов [Sillitoe, Martensen, 2010]. Поэтому о реальной количественной динамике формирования месторождений пока судить достаточно затруднительно. Для отдельных объектов установлены мажорирующие границы сверху или снизу по магматогенным событиям (внедрение пострудных даек, время становления дорудного штока и т.п.) [Пономарчук, 2005; Сотников, 2006; Mamani et al., 2008, 2010; Chen et al., 2010; и др.]. Поэтому при статистической обработке имеющейся информации по датированию ВПМ речь может идти скорее о количественных оценках времен формирования групп месторождений в форме поясов или временных границах эпох рудообразования [Wilkinson, Kesler, 2009]. Так, в структурах Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) обнаружены ситуации, когда месторождения медно-молибден-порфировой формации в «геологическом времени» по месту последовательно совмещались с разными геодинамическими обстановками [Добрецов, 1994; Сотников, 2006]. При этом общие отрезки времени, охватывающие развитие таких месторождений, в ряде случаев составляют более 100 млн лет. При попытках разобраться в природе подобных явлений, целесообразно базироваться на статистических исследованиях хроноструктуры проявления LIPs [Rampino, Caldeira, 1993; Добрецов, 1994; Condie, 2001; Isley, Abbott, 2002; Prokoph et al., 2004]. В этих работах показано, что по характеру длительности и типам кривых распределения возрастов магматических комплексов можно предвидеть возможность реализации трех динамических типов мантийных магматических систем, которые определяли выплавление и дифференциацию магм в материнских и промежуточных литосферных очагах, с которыми могут быть связаны некоторые из обсуждаемых объектов. Внутриплитные рудопроизводящие бимодальные магматические серии [Модельный анализ..., 2009] и часть таких объектов активных окраин являются продуктами термического воздействия астенотиниз на толщи литосферы [Camp, Ross, 2004]. Но в целом для активных окраин Тихого океана эта проблема недостаточно ясна, поэтому и интересен как статистический анализ цикличности РМС, так и оценки моно- и полихронности месторождений этих океанических окраин.

В качестве содержательной основы такой работы будем учитывать следующие структурно-геологические характеристики развития вулканоплутонических рудно-магматических систем (ВПМ РМС) активных окраин Тихого океана [Шило и др., 1992; Сотников, 2006; Cooke et al., 2005; Модельный анализ..., 2009; Pirajno, 2009; Sillitoe, 2010; и др.]: 1) существование рудных поясов; 2) наличие определенных временных эпох развития ВПМ; 3) полистадийность рудоносных магматических комплексов и сопряженных с ними флюидогенных процессов рудообразования в изученном интервале глубин от субаэральной разгрузки гидротерм на поверхности вулканических построек до 4—6 км; 4) внедрение перед каждой стадией рудообразования даек или штоков порфиридных гранитоидных пород различной щелочности; 5) направленное изменение со временем состава рудных элементов и минералов руд, а также околорудных изменений; 6) обычное проявление пострудных дайковых комплексов.

Существующие геологические данные показывают [Dynamic..., 2001], что на шкале геологических событий эпохи рудообразования имели некоторую длительность и частоту реализации конкретных РМС [Wilkinson, Kesler, 2009]. Следовательно, стадии рудообразования в ВПМ имеют свои длительности и частоты проявления. Полифазные комплексы рудоносных интрузивов обладают своими временными характеристиками [Шило и др., 1992; Richards et al., 2001; Manami et al., 2008; Redmond, Einaudi, 2010; Sillitoe, Martensen, 2010]. Поэтому процессы формирования сопряженных с ними месторождений должны иметь собственную хроноструктуру и длительность. Иными словами, при анализе динамики рудно-магматических систем (РМС) рассматриваемого типа необходимо иметь в виду, что в РМС есть два сопряженных процесса с двумя «параллельными» шкалами событий. Их датирование обеспечивается инструментально одной или разными методиками [Интерпретация..., 2001]. При этом указанные шкалы событий характеризуют: 1) формирование структурно-вещественного комплекса магматических тел на поверхности Земли (вулканические сооружения) и в земной коре до глубин порядка 10 км; 2) формирование полей «наложенной» рудной и околорудной минерализации («рудное месторождение»), которые лишь частично пространственно сопряжены с магматическими телами. Очевидно, что по временному интервалу проявления первый комплекс явлений шире второго. Понятно, что содержательность количественного анализа динамики ВПМ определяется «чувствительностью» инструментальных методов, используемых для оценки времени проявления того или иного эндогенного события [Интерпретация..., 2001], тем, какие объекты и как опробовались при датировании. Следовательно, при статистическом анализе данных датирования событий в РМС можно ожидать раскрытия только тех связей, продолжи-

Таблица 1.

**Распределение на временной линейке постпалеозойских ВПМ  
на тихоокеанских окраинах Американского континента**

Время (t), млн лет	Северная Америка															
	Au			Cu-Au			Cu			Cu-Mo			Mo-W			
	Al	Kn	USA	Al	Kn	USA	Al	Kn	USA	Al	Kn	USA	Al	Kn	USA	
0—25	0	0	98	0	6	0	20	0	6.7	20	0	4	0	5	23	
26—50	0	0	0	100	0	20	0	0.36	6.7	0	8	30	100	5	35	
52—75	75	0	2	0	10	60	20	5	62	20	17	58	0	57	29	
76—100	13	20	0	0	10	20	20	10	4	20	42	4	0	14	13	
101—125	12	0	0	0	0	0	40	0	6.7	40	2	0	0	9.5	0	
126—150	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	8	0	0	9.5	0	
151—175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
176—200	0	80	0	0	31	0	0	26	0	0	25	4	0	0	0	
201—225	0	0	0	0	53	0	0	26	2	0	0	0	0	0	0	
<i>n</i>	8	5	41	1	19	5	5	19	45	5	12	26	1	21	17	
Время (t), млн лет	Южная Америка															
	Au				Cu_Au				Cu				Cu-Mo			
	Col-Ecv	Peru	Arg	Chli	Col-Ecv	Peru	Arg	Chli	Col-Ecv	Peru	Arg	Chli	Col-Ecv	Peru	Arg	Chli
0—25	0	100	0	100	25	100	100	0	47	43	77	15	0	0	100	50
26—50	0	0	0	0	0	0	0	0	18	14	15	69	0	0	0	50
52—75	0	0	0	0	25	0	0	0	23	43	0	8	0	0	0	0
76—100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0
101—125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126—150	100	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
151—175	0	0	0	0	25	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0
176—200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
201—225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>n</i>	1	5	0	5	4	3	1	0	17	7	13	26	0	0	1	6

Примечание. *n* — число объектов в отдельных секторах окраины; Al — Аляска, Kn — Канада, USA — Соединенные Штаты Америки, Col — Колумбия; Ecv — Эквадор; Peru — Перу; Arg — Аргентина; Chli — Чили.

тельности которых удовлетворительно обеспечиваются существующими инструментальными методами при «геологически оправданном» отборе образцов для датирования. Попытаемся их оценить.

В первом приближении картина цикличности магматических событий следует из оценки пространственного распределения датированных вулканоплутонических поясов [Manami et al., 2008], состава руд и окорудных пород месторождений в вулканических дугах [Sinclair, 2008], разломов и геофизических полей [Hildenbrand et al., 2000]. Приблизительно картина динамики РМС для послепалеозойского времени на восточных окраинах ТО отражена в табл. 1. Несложно видеть, что на грубой временной линейке распределение дат разных металлогенических типов ВПМ неоднородно, а частоты их появления существенно различны. При детализации полученной картины исследователь неизбежно сталкивается с тем, что радиологические даты всегда представлены конечным рядом дискретных величин, изменение которых на временных линейках имеет разные инструментальные погрешности [Интерпретация..., 2001]. Ухудшение точности определения дат сопряжено с увеличением «веса» относительной погрешности определения дат с увеличением возраста объекта в любом методе радиологического датирования. Существенно также то, что полнота знания рассматриваемых процессов убывает от нулевой отсечки на геологической шкале событий в их глубину. Вещественные потери информации связаны с денудацией вулканогенных разрезов и преобразованием их структуры при надвигах и складчатости. Поэтому методологические аспекты количественного анализа информации требуют пояснения.

#### МЕТОДОЛОГИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЧИСЛОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сложность проблемы обработки и содержательной интерпретации количественной информации относительно дат развития ВПМ состоит, с одной стороны, в том, что они связаны с материальными

продуктами процессов, протекание которых сопровождается прерываниями различной длительности, временные характеристики которых неизвестны.

Вторая весьма существенная проблема состоит в том, что возможное количество дат конечно и может быть невелико. Поскольку рассматриваемые месторождения сопряжены с кислыми магмами, то в субэвральных вулканоплутонических системах на поверхности Земли их структурными проявлениями являются или стратовулканы, или кальдеры, возникающие после их эксплозивных разрушений. Так, при размере кальдеры порядка 10 км в вулканическом поясе шириной 100 км и длиной 1000 км предельное количество одноактных месторождений может быть 100. Это количество со временем мало меняется, поскольку в реальных магматических системах существенного смещения проницаемых зон в литосфере не фиксируется. Действительно, в каталогах описанных объектов западной окраины Северной Америки [Singer et al., 2005a,b; Sinclair, 2008] в вулканических поясах фиксированного возраста показано меньшее количество ВПМ, чем эта виртуальная оценка. Следовательно, есть нерешенная содержательная проблема использования разработанных статистических методов описания таких специфических систем, как РМС, формирующих ВПМ. Второй методологический аспект проблемы состоит в том, что при выборе масштаба временных линеек для анализа экспериментального временного ряда дат возникают два рода неопределенностей: 1) как искать подходящий масштаб при построении линейки, если инструментальные неопределенности измерений величин на любой шкале для крайних дат могут различаться на порядки, 2) как экспериментально установленная дискретность измерений соотносится с длительностью реальных перерывов протекания эндогенных процессов.

Использование аппарата классической теории вероятностей для данной ситуации, по-видимому, затруднительно. Для реализации поставленной задачи мы нашли, возможно, не лучшую, но прагматичную методологию в форме модельно-конструктивистского похода в анализе статистических связей [Малиновский, 2002]. Практическое существо такой методологии сводится к апелляции исследователя к имеющемуся практическому опыту и «здравому смыслу» как при выборе для анализа известных в приложениях методов описания «поведения» временных рядов с прерываниями, так и при оценке правдоподобности содержательных трактовок полученных численных результатов.

Нами использованы следующие основные приемы обработки экспериментальных данных: 1) замена дискретного ряда, в котором прерывания связаны с природой изучаемого явления, функцией распределения частот событий на временных линейках с некоторыми временными шагами, 2) ограничение временной линейки геологических событий отрезком временами не более 300 млн лет, который включает порядка 95 % известных нам дат проявления ВПМ, полученных разными инструментальными методами. Их количественные соотношения выглядят следующим образом: K-Ar — 68 %,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  — 10.5 %, Rb-Sr — 2.1 %, U-Pb — 11.4 %, Re-Os — 8.0 %.

Проблема выбора шкал сложный вопрос, решение которого, похоже, не имеет однозначного решения по указанной выше причине. Поэтому мы базировались на известном, по-видимому, удачном опыте статистической обработки информации в анализе цикличности развития LIPs [Prokoph et al., 2004]. Выбор в этой работе линейки с шагом в 1 млн лет при ее длине порядка миллиарда лет оказался вполне содержательным. Поскольку нами рассматриваются отрезки геологической истории активных окраин менее 300 млн лет, то наиболее широкий шаг в 1 млн лет мы посчитали продуктивным первым приближением. Минимальный шаг на длине линейки 100 млн лет был в анализе ряда выборок на порядок меньше. Получение оценок проводилось с использованием программных комплексов (ПК) STATISTICA 6.0 и MATLAB R2009b. Поскольку нами обсуждаются более сложные магматогенные объекты, чем LIPs, то возникла необходимость применения ряда дополнительных походов — исследование периодичности функций распределения с прерываниями методом ARIMA, авто- и кросскорреляции временных рядов с последующим их вейвлет-анализом. Последний [Смоленцев, 2005] используется преимущественно для разложения сигналов функции с графиком типа небольшой волны (вейвлеты) вместо традиционных длинных синусоидальных волн, используемых в анализе Фурье. Это дает более гибкую технику обработки сигналов, чем в первом методе. Одно из основных преимуществ вейвлет-анализа заключается в том, что маленькие волны позволяют заметить хорошо локализованные изменения сигнала, тогда как в коэффициентах Фурье отражается поведение сигнала за все время его существования. В общем случае непрерывное вейвлет-преобразование временного ряда  $s(t)$ , заданного на интервале  $-\infty \leq t \leq \infty$  есть свертка  $W(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) G\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$  этого ряда с семейством функций, получаемых из вейвлета  $G(t)$  всевозможными сдвигами ( $b$ ) и перемасштабированиями ( $a$ ). С помощью

непрерывного преобразования сигнал  $s(t)$  из двумерной плоскости переводится в трехмерное пространство с координатами: время ( $b$ ), масштаб ( $a$ ) и амплитуда ( $c$ ). При этом сигнал раскладывается на гармоники с частотами, соответствующими масштабам ( $a$ ). В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала одновременно в физическом и частотном пространствах. Таким образом,

Таблица 2. Оценка периодичности формирования РМС ПФ на западной и восточной окраинах ТО на основании вейвлета Морле (млн лет)

№ п/п	N Am	S Am	Sum W Pas	Jap-Kam	W Pas	N Z
1	3.5	3	3	0.5	0.5	0.6
2	4.5	6	5	0.9	0.7	0.8
3	6.5	12	13.5	1.4	1.1	1.4
4	10	29	19	1.8	1.7	2.4
5	13	<b>32.5</b>	42.5	2.8	2.1	3.1
6	17	44	—	5.0	3.0	—
7	<b>25.1</b>	<b>65</b>	—	6.6	5.2	—
8	50	—	—	9.9	—	—
<i>n</i>	205	243	404	190	146	68

Примечание. По данным [Prokoph et al., 2004], периодичность эпох LIPs на основании вейвлета Морле для линейки событий 0—300 млн лет имеет значения: 1) 15—16 млн лет, 2) 25 млн лет, 3) 32 млн лет, 4) 60 млн лет. В таблице полужирным шрифтом выделены значения, близкие или совпадающие с этими оценками. Курсивом обозначены совпадения периодов на западной и восточной окраинах ТО.

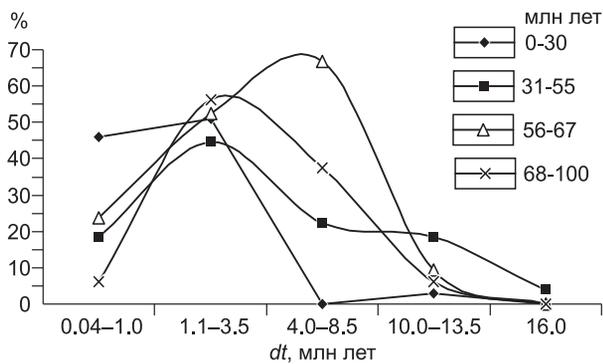
Sum W Pas, Jap-Kam, W Pas, N Z — см. примечание к табл. 4.

вейвлет-разложение дает возможность рассматривать частотные уровни как в совокупности, так и независимо друг от друга, выявлять основные частоты сигнала, решать задачи фильтрации шумов. При вейвлет-анализе временных рядов в начальной стадии их изучения, по данным упомянутых баз данных, в которых цифровые значения имеют весьма разную инструментальную обеспеченность дат в разных работах (табл. 2), затруднительно уверенно выбирать параметры *a* и *b* [Интерпретация..., 2001; Prokoph et al., 2004]. Здесь следует отметить только то, что выбор нами вейвлета Морле определен был тем, что мы считали корректнее использовать при сравнении результаты, полученные методом, которым исследовалась периодичность проявления LIPs [Prokoph et al., 2004]. Его применение ограничено протяженностью линейки событий порядка 120 шагов. Поэтому для более коротких временных отрезков геологической истории при временном шаге 0.1—1 млн лет использовались другие вейвлеты, что далее указывается в конкретных случаях. Поэтому была принята отмеченная последовательность анализа временных рядов для рудопродуктивных изверженных пород и сопряженных с ними месторождений. В качестве начальных шагов в обработке массивов данных рассматривались базовые статистики с построением гистограмм, которые детализируют данные табл. 1 для времен развития рудоносных магматических комплексов и сопряженных с ними рудных месторождений. В рамках журнальной статьи затруднительно привести список работ, которые содержат исходную информацию. Большая ее часть включена в цитированные базы данных [Singer et al., 2005a,b; Sinclair, 2008], которая дополнена данными из более поздних, чем эти сводки, публикаций. Поэтому нами цитируются только те из использованных работ, которые были необходимы для генетических интерпретаций.

#### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИКИ РМС ОБЛАСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ВПМ ОКРАИН ТИХОГО ОКЕАНА

Указанные выше численные данные позволяют искать оценки ряда качественных или количественных элементов динамики РМС по пространственным и временным параметрам их реализации в различных секторах окраин ТО: 1) получить оценки длительности развития рудно-магматических систем и месторождений; 2) сравнить временные характеристики проявления металлогенических типов ВПМ по окраинам ТО; 3) получить оценки длительности эпох рудообразования и характер цикличности их проявления; 4) сопоставить спектральные характеристики временных линеек формирования ВПМ различных сегментов окраин ТО или отдельных вулканических дуг: Курило-Камчатские, Японские; вулканические дуги западного сектора Тихого океана; Новозеландская вулканическая дуга; три сектора восточной окраины ТО, — запад Северной Америки и андийские вулканические дуги Южной Америки и т.д. Нами не рассматривается Карибский бассейн, поскольку его западная часть относится к продолжению вулканических структур Мексики, а южная окраина бассейна рассматривается как геодинамическая зона Южной Америки [Manami et al., 2008, 2010].

Анализ табл. 1 показывает, что существуют неоднородности в пространственном распределении металлогенически различных ВПМ вдоль восточных секторов эпиконтинентальных вулканических дуг



**Рис. 2.** Соотношение «среднее время формирования—продолжительность рудообразующих процессов» в РМС ПФ для линейки 0—100 млн лет, включающей 74 % описанных месторождений [Singer et al., 2005a,b; Sinclair, 2008].

ТО. Однако в отдельных эпохах рудообразования прослеживается повторяемость их реализации в разных секторах ТО. Наиболее наглядно в этом отношении ситуация с медно-порфировыми месторождениями. Поэтому можно искать обобщенные статистические оценки временных характеристик ВПМ.

**О длительности формирования РМС.** Для РМС мезозойских и палеозойских месторождений порфировой формации (ПФ) Азиатского континента В.А. Пономарчуком [2005] был обнаружен тренд увеличения длительности ( $dt$ ) формирования РМС с ростом  $t$ . В использованных базах данных за этот показатель нами принимается разница между средним и максимальным значениями возрастов, которые приведены в использованных табличных данных. В анализируемой нами выборке аналогичных месторождений окраин ТО для интервала времен 0—100 млн лет (~ 80 % всех изученных объектов) отмеченной тенденции не просматривается (рис. 2). Для охарактеризованной датами геологической линейки событий (0—2 млрд лет) не обнаруживается линейных связей между временем формирования рудоносных магматических комплексов ( $t$ ) и длительностью их становления ( $dt$  ms), как и аналогичными значениями для сопряженных с ними месторождений ( $t - dt$  ore),  $-r + 0.32(t - dt$  ms),  $r + 0.35(t - dt$  ore). Сравнение величин  $dt$  для магматических ( $ms$ ) и рудообразующих систем показывает, что первые или близки величинам  $dt$  ore, или на 1—2 млн лет превышают их датированную длительность. Исследование автокорреляционной функции временного ряда  $dt$ —ore показывает, что на лагах (шагах смещения относительно начала линейки) от +1 до +15 фиксируются значимые положительные коэффициенты корреляции с максимумами на втором и четвертом лаге. Использование функции автокорреляции подтверждает значимости этих величин. Поэтому можно искать оценки периодичности хотя бы в низкочастотной части спектра. Расчеты периодичности  $dt$  методом ARIMA показывают, что главными являются периоды: 1) 0.5 млн лет, 2) 0.3 млн лет и далее по убыванию значимости: 3) 1.6 млн лет, 4) 2.6 млн лет, 5) 8.3 млн лет. Более грубые интервальные оценки частот встречаемости длительностей формирования месторождений для выборки из 160 дат имеют следующие относительные оценки: 15 % случаев  $dt \leq 0.5$  млн лет; 12.5 %  $dt \leq 1$  млн лет; 17.5 %  $dt \leq 2$  млн лет; 11 %  $dt \leq 3$  млн лет; 7 %  $dt \leq 4$  млн лет; 7.5 %  $dt \leq 5$  млн лет; 5 %  $dt \leq 6$  млн лет; 3 %  $dt \leq 30$  млн лет.

Несложно видеть, что в ~ 50 % случаях времена формирования ВРМ не превышают 3 млн лет, тогда как месторождений, имеющих времена формирования, сопоставимые с длительностью кристаллизации батолитовидных гранитоидных плутонов, составляют всего 15 % от общего числа охарактеризованных данными датирования объектов. Анализ детально изученных ВПМ конкретизирует эти оценки [Sillitoe, Martensen, 2010]. Следовательно, подавляющее большинство ВПМ являются полихронными. Поэтому весьма интересной представляется проблема оценки периодических характеристик временных рядов магматических рудоносных систем и сопряженных с ними ВПМ.

**Периодические характеристики цикличности временных рядов развития РМС окраин Тихого океана.** Рассматриваемые нами временные ряды относятся к распределению на временной шкале последовательности сходных по природе и возобновляемых после некоторых перерывов эндогенных процессов. Такое проявление процессов относят к циклическим явлениям. Одна из проблем статистического изучения таких циклических последовательностей сводится к оценке того, насколько совпадают длительности времени между концом одного и началом следующего цикла. Совпадение не только отрезков времени между циклами, но и между максимумами циклов, позволяет относить такую цикличность к периодическим системам. Попробуем, отталкиваясь от результатов работы [Пономарчук, 2005], сравнить временные ряды развития рудно-магматических систем (РМС) в разных секторах ТО (см. табл. 1). Приведенные выше данные использования отдельных методик датирования позволяют для таких обобщенных региональных оценок использовать смешанные ряды дат, среди которых для изверженных и околорудных пород преобладают даты, полученные одним методом.

Приведенная выше информация для  $t$  и  $dt$  РМС ПФ показала, что длительность стадийного развития процессов рудообразования на отдельных объектах охватывает больше чем одну рудную эпоху

[Wilkinson, Kesler, 2009]. В этом случае может идти речь и о цикличности рядов РМС. Если это так, то возникает вопрос, есть ли в них периодичность. Эта особенность наиболее просто выявляется при анализе автокорреляционных функций и функций парциальной автокорреляции временных рядов средних значений инструментально оцененных отрезков времен проявления РМС. Проанализируем с этой точки зрения региональные временные ряды секторов восточных и западных активных окраин ТО. Автокорреляционные функции этих рядов показательно: 1) временной ряд РМС западной окраины Южно-Американского континента (S Am) обладает периодической функцией корреляции на всех лагах выше белого шума с величинами коэффициента корреляции  $+0.15...+0.4$ . При этом функция парциальной автокорреляции показывает четкую периодичность (+) на лагах 2, 4, 6, 8, 10, 12; 2) временной ряд дат формирования РМС западной окраины Северо-Американского континента (N Am) имеет ритмическое затухание корреляции до незначимой к пятому лагу; его функция парциальной автокорреляции проявлена весьма ограниченно — положительные значения выражены только на первых четырех лагах, на всех других — значения не выше границы белого шума; 3) ряд суммарных наблюдений для западной окраины Тихого океана (Sum WP) характеризуется линейным снижением положительной корреляции до незначимой к четвертому лагу; функция парциальной автокорреляции проявляет затухание к пятому лагу. Таким образом, все региональные временные ряды МС имеют в цикличности более или менее выраженную периодичность, характеристики которой похожи на показанные для *dt ore*.

В таком случае возникает вопрос, насколько подобна периодичность временных разных секторов активных окраин Тихого океана. Об этом можно судить уже на основе их функций кросскорреляции. Таковая для рядов S Am—Sum WP обнаруживает отсутствие значимых коэффициентов корреляции на отрицательных лагах, тогда как на положительных лагах в интервалах  $+1...+4$  имеется положительная корреляция порядка 0.9, которая затухает через лаг до незначимой. Функция кросскорреляции рядов N Am—Sum WP обнаруживает отсутствие значимых коэффициентов корреляции на отрицательных лагах, тогда как на положительных лагах в интервалах  $+7...+14$  имеется положительная корреляция, максимум которой порядка 0.5 на лаге  $+10$ . Функция кросскорреляции рядов S Am—N Am показывает слабую периодическую положительную корреляцию на отрицательных лагах и отсутствие значимых корреляций на положительных. Отдельные ряды секторов западной окраины ТО на такой временной линейке обнаруживают следующие соотношения: 1) практически отсутствует кросскорреляция между временными рядами вулканической дуги Новой Зеландии (N Z) и дугами Японии и Курило-Камчатских (Яр-Кам); 2) функция кросскорреляции временных рядов Яр-Кам и вулканических дуг западного сектора Тихого океана (Филиппины, Индонезия, Папуа-Новая Гвинея — W Pas) обнаруживает слабую положительную их корреляцию на лагах  $+1...+3$ ; 3) наиболее коррелируются ряды N Z—W Pas, которые имеют положительные коэффициенты корреляции порядка 0.5 на лагах  $+3, +9, +13, +15$ .

Из этих соотношений следует, что имеется относительно слабое подобие периодичности развития РМС между всеми секторами активных окраин ТО. Конкретнее их сходство и различие можно оценить, сравнив их частотные характеристики и выраженность периодической структуры на сходных отрезках отдельных временных рядов.

**Характеристика периодичности развития РМС методом ARIMA на основе анализа их временных рядов.** Для изучения рассматриваемых нами временных рядов с прерываниями в ПК STATISTICA 6.0 рекомендуется метод ARIMA. С его помощью удастся построить модель стационарного периодического развития рассматриваемых магматических систем. Для оценок выраженности отдельных частот во временных рядах анализ общего спектра их периодичностей в качестве первого приближения стационарная идеализация может быть полезна. В этом отношении сравнение полученных спектров, приведенных в табл. 3, достаточно интересно. Так, в низкочастотной части исследованные ряды показывают следующие особенности: 1) во временной последовательности формирования РМС Северной Америки наиболее резко проявлена периодичность 5 млн лет и относительно редуцирована частота событий с периодом 1 млн лет. Для сектора Южной Америки характерна обратная ситуация — для РМС этой окраины наиболее характерна периодичность 1 млн лет при редуцированности периода 5 млн лет. Существенно также то, что длиннопериодические последовательности этих секторов различны. Хроноструктура магматических событий на западной и восточной окраинах ТО существенно различна, их главные максимумы практически асинхронны.

Из данных табл. 3 также следует, что РМС северо-западного и юго-восточного секторов западной окраины ТО не обнаруживают признаков синхронизации. Некоторая коррелируемость РМС западного сектора в разных частях спектров с таковыми в соседних секторах указывает на существование некоторой широтной разделяющей структуры.

Имеющаяся статистика событий не позволяет более определенно указать ее положение.

Сопоставления периодичностей длительности формирования ВПМ и приведенных в этой таблице периодов их развития рудно-магматических систем не имеют аналогов низкочастотной части спектров с данными по периодичности длительности формирования ВПМ Северной и Южной Америки. Более

Таблица 3. Соотношения периодов формирования (порядок номеров по значимости) для различных металлогенических рядов ВПМ западной окраины Северной Америки и формирования рудопродуктивных магматических комплексов (метод ARIMA)

№ п/п	Er	Cu	Cu-Mo	Mo-W	Ign rock
1	15	32	51	51	17
2	8	54	12	20	46
3	5	45	29	38	63
4	20	3	3	3	59
5	0.1	7	73	29	6
6	—	25	—	—	2
7	—	—	—	—	52

Примечание. Значения величин периодов приведены в млн лет, порядок номеров отвечает значимости плотностей в функции распределения частот, Er — эпitherмальные месторождения, Cu — медно-порфировые ВПМ; Cu-Mo — медно-молибден-порфировые ВПМ; Mo ± Au ± Ag ± W — ВПМ; Ign rock — комплексы изверженных пород. Для района Хребтов и Бассейнов периодичность формирования ВПМ выглядит как: 0.5; 13; 27; 32; 25 млн лет.

близки данным периодичности длительностей формирования ВПМ значения главных частот периодов развития рудно-магматических систем западных окраинах Тихого океана в низко- и среднечастотных частях спектров.

#### Исследование периодичности региональных временных рядов с помощью вейвлет-анализа.

Продуктивность вейвлет-анализа цикличности временных рядов магматических процессов на временной линейке всей геологической истории их фиксации была продемонстрирована на примере LIPs [Prokhor et al., 2004]. Предварительно проведенный Фурье-анализ позволяет более «точно» выбирать частотные уровни при построении циклограмм и анализировать уровни разложения при построении вейвлета Морле. Результаты вейвлет-анализа временных рядов, показанных в табл. 4, обобщены в табл. 2. Рассмотрение оценок периодичности исследованных временных рядов, полученные на основе вейвлета Морле (табл. 5), дополняя вышеуказанные данные кросскорреляционного анализа, в целом позволяет увидеть как различия хроноструктуры исследованных временных рядов, так и проследить полученные периодичности в PMC и LIPs. Как можно было ожидать из данных кросскорреляционного анализа, максимальное подобие периодичности рядов просматривается для низких частот. Практически все они различаются в длиннопериодических последовательностях. Эти различия отражают разнообразие локальных временных отсечек как проявления тектонических циклов в эпохах рудообразования в одних секторах окраин ТО, так и их редуцированность в других. Последнее весьма наглядно для секторов западных окраин ТО для линейки событий, где временной шаг в их фиксации на полпорядка меньше, чем при использовании более «грубой» временной линейки.

Таблица 4. Оценка периодичности (млн лет) формирования PMC ПФ на западной и восточной окраинах ТО методом ARIMA

№ п/п	N Am	S Am	Sum W Pas	Jap-Kam	W Pas	N Z
1	5	<i>I</i>	12	5.5	1	<i>1.3</i>
2	3.5	13.5	<i>I</i>	0.2	8.5	0.8
3	<i>I</i>	15.5	5.5	<i>1.4</i>	21.3	<i>2.4</i>
4	16	41.5	—	2.6	4	1.8
5	24	44.5	—	—	6	—
6	14	—	—	—	—	—
7	32.5	—	—	—	—	—
<i>n</i>	205	243	404	190	146	68

Примечание. Региональные и общие временные ряды: N Am — Северная Америка; S Am — Южная Америка; Sum W Pas — суммарная статистика для вулканических дуг Камчатки, Курильских и Японских островов, Филиппин, Индонезии, Папуа Новой Гвинеи, Новой Зеландии; N Z — Новая Зеландия; W Pas — Западно-Тихоокеанский сектор (Филиппины, Индонезия, Папуа Новая Гвинея); Jap-Kam — дуги Камчатки и Японских островов. Значения периода (в млн лет) отвечают относительным значениям плотности частот передиограммы. Курсивом обозначены значения периодичностей, совпадающие или близкие в отдельных рядах. Полуужирный шрифт относится к рядам с временным шагом 0.5 млн лет. *n* — число событий.

Таблица 5. Соотношения средних вычисленных по нормальным распределениям погрешностей и доверительных интервалов по нормальным распределениям средних с оценками по смешанным распределениям этих параметров (млн лет)

№ п/п	Порода	Оценка среднего возраста ( $t$ )	Оценка среднего возраста ( $\sigma$ )	Оценка среднего возраста [Maskaev et al., 2004]
1	Дорудный порфир	6.75	7.0	6.46
		6.25	6.75	5.67
		5.75	6.22	—
		—	6.15	—
2	Гранодиоритовый штوك Свелл	6.25	6.25	6.15
		6.13	6.15	5.59
		5.95	6.05	—
		5.55	5.9	—
3	Центральный кварцевый диорит-тоналит	6.75	—	—
		6.25	6.2	6.28
		5.75	6.0	5.5
		5.25	—	—
4	Северный диорит-тоналит	6.72	6.05	6.11
		6.25	5.95	5.49
		5.75	5.85	—
		5.25	—	—
5	Дацитовый порфир	5.3	5.3	5.28
		5.1	—	—
		4.9	—	—
		4.7	—	—
6	Дацитовая дайка	5.1	4.9	—
		4.9	4.75	4.82
		4.7	—	—
		4.5	—	—

Примечание.  $t$  — среднее, полученное из предположения нормального распределения измеренных дат,  $\sigma$  — среднее, полученное из предположения нормального распределения погрешностей измерения дат, оценки средних в цитированной работе.

Сопоставление периодичности LIPs и РМС ПФ (см. табл. 2) показывает, что не видно временной связи активизации РМС в западном секторе ТО и мантийных плюмов, формирующих вулканические плато или вулканические хребты ТО [Rampino, Caldeira, 1993; Camp, Ross, 2004; Schutt et al., 2008; и др.]. Похоже, что развитие наиболее древних РМС ПФ Южной Америки по времени как-то сопряжено с плюм-тектоникой. В постпалеоогценовое время характерно совпадение периодичности РМС ПФ Северной Америки, периодичности LIPs (ареальных базальтов) и кислого вулканизма, что объясняется своеобразием динамики процессов растяжения и воздымания земной коры района Хребтов и Бассейнов [Moore et al., 1994; Jordan et al., 2004; McQuarry, Wernikel, 2005; Lerch et al., 2008; и др.]. Проблема перманентного пространственного и временного смещения максимумов проявления рудоносных бимодальных вулканоплутонических комплексов и развития ареальных базальтов на западной окраине Северной Америки интересна как петрогенетическая задача динамики циклического развития пространственно сближенных магматических питающих очагов, относящихся, по-видимому, к одной мантийно-коровой магматической системе. Для нас в рамках анализа хроноструктуры временных рядов существенно выяснить, как может быть связана длительность и стадийность формирования месторождений ПФ с интрузивными телами различных фаций глубинности и коровыми очагами гранитоидных расплавов. Эта задача сопряжена с анализом распределения в пространстве со временем различных типов месторождений порфировой формации. Рассмотрим существующую на этот счет информацию для западной окраины Северной Америки [Thomson et al., 1995; Hildenbrand et al., 2000; John, 2001; Singer et al., 2005a,b; Sinclair, 2008].

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СМЕЩЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ И ЦИКЛИЧНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ВУЛКАНОПЛУТОНИЧЕСКИХ РМС НА АКТИВНЫХ ОКРАИНАХ ТИХОГО ОКЕАНА

На рис. 3 показано распределение на временной шкале с шагом 5 млн лет постпалеозойских месторождений порфировой формации на северо-американской окраине ТО, которое включает около 87 % дат из использованных нами при анализе временных рядов. Порядка 11 % из них относятся к триасовым и юрским объектам, около 26 % возникли в меловое время, остальные появились позднее. Таким образом, судя по данным датирования, на данной окраине ТО просматривается нарастание числа событий к четвертичному времени развития вулканических дуг. Исследование тектоники и развития магматизма континентальных окраин на границах ТО [Dynamic..., 2001; Manami et al., 2010] указывают на разные тенденции в их динамике: 1) циклическое смещение со временем с запада на восток эпиконтинентальных вулканических поясов на северо-западной окраине ТО и наличие современной фронтальной зоны вулканизма перед глубоководным желобом в Курило-Камчатских вулканических дугах, 2) на западных континентальных окраинах Северной и Южной Америки фиксируется обратная ситуация, 3) глобально-вулканические эпиконтинентальные процессы на окраинах ТО со временем смещаются с севера на юг. О характере синхронизации этих событий можно судить по данным табл. 2, 4. Из этих данных следует, что при некоторой степени подобия в отношении вида периодичностей между конкретными секторами, устойчивость низко- и средневысоких гармоник существенно различается. Наиболее близки характеристики низкочастотной части спектров. Весьма существенно, что распределение на временной линейке разных металлогенических типов месторождений различно (см. рис. 3).

В этом отношении показательны элементы динамического металлогенического анализа для Северной Америки в [Hildenbrand et al., 2000; Singer et al., 2005a,b; Sinclair, 2008]. Для вулканических поя-

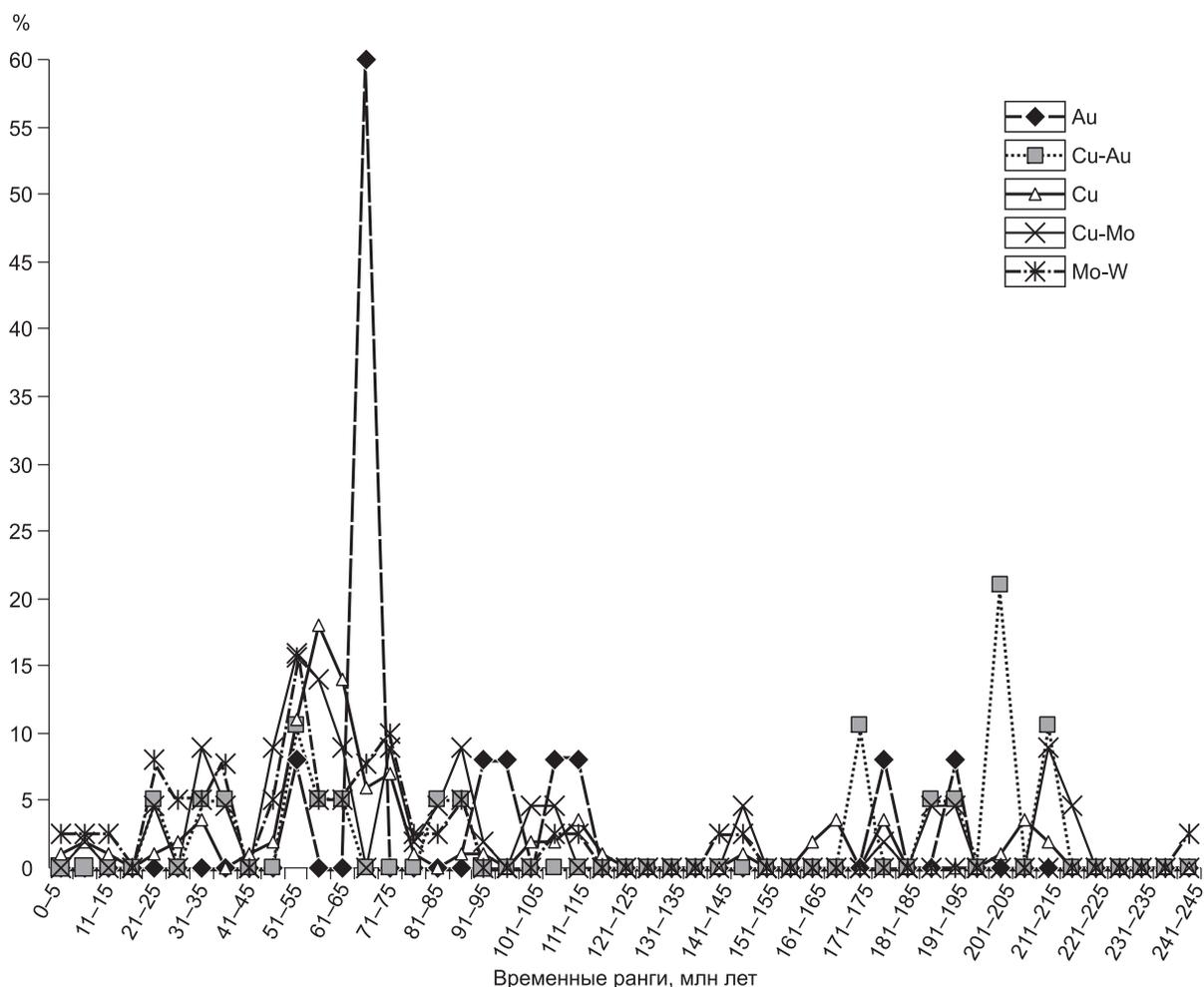
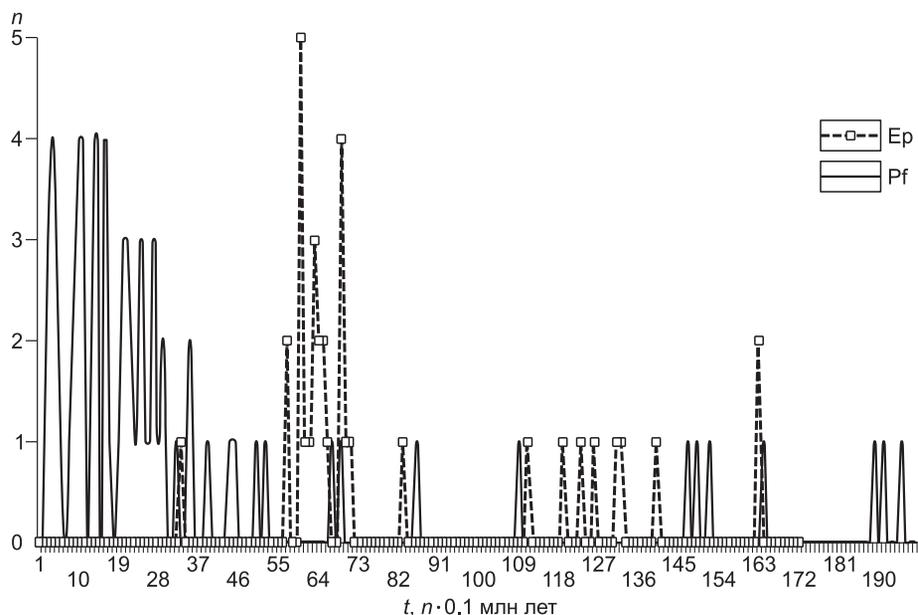


Рис. 3. Соотношение дат формирования металлогенических типов ВПМ западной окраины Северной Америки.

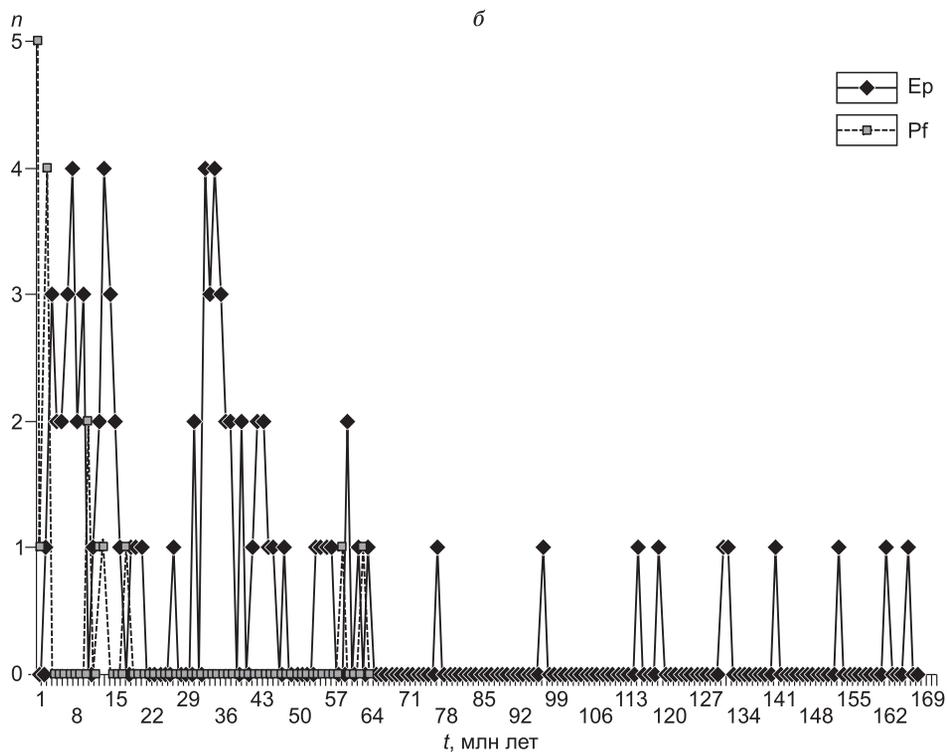
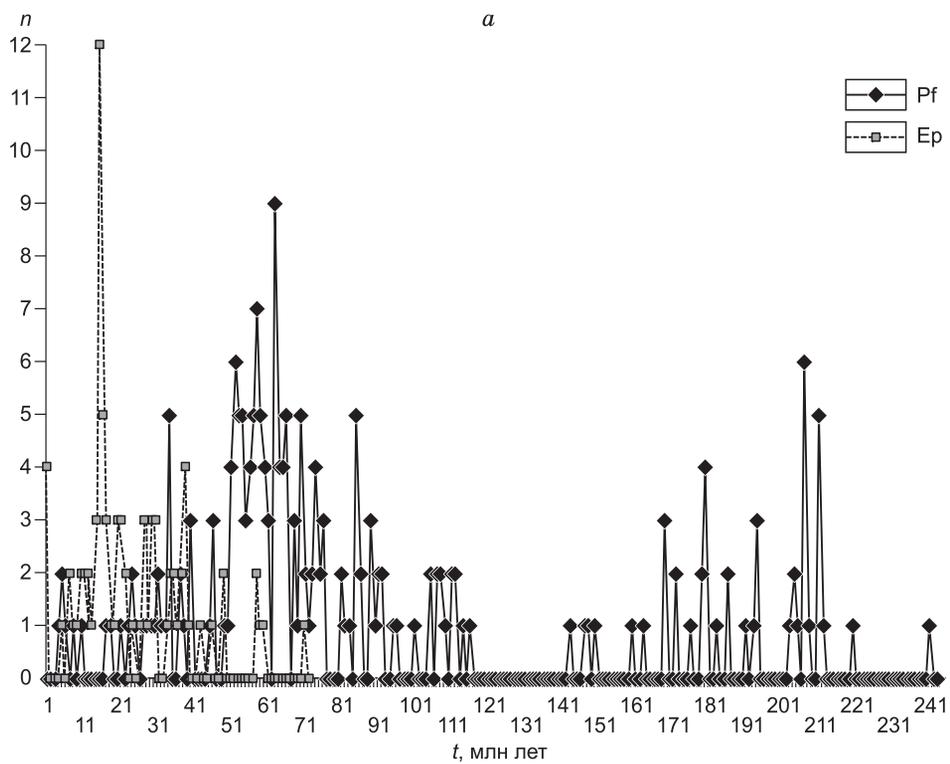


**Рис. 4.** Распределение частот проявления эпитермальных (Ep) и порфириковых (Pf) ВПМ в Новозеландской вулканической дуге.

сов Южной Америки эта задача решена более последовательно [Gunnell et al., 2010; Manami et al., 2008, 2010; Roperch et al., 2008]. Нами использован развитый в этих работах подход для сравнения временных характеристик развития металлогенических типов ПВМ — сопоставление временных линеек их формирования ВПМ в отдельном вулканическом поясе (Новая Зеландия) или для соседствующих секторов континентальных окраин (Северная и Южная Америка) путем последовательного сопоставления частот во временных отрезках  $dt = 100$  млн лет, когда выборки дат достаточны для более подробного анализа, чем данные рис. 3. В случае наличия таких данных фиксируются разнонаправленные реализации. Соотношения временных рядов развития месторождений порфириковой формации и эпитермальных месторождений Новой Зеландии показаны на рис. 4.

Из вида этого графика следует, что появление эпитермальных месторождений в данном вулканическом поясе обычно предшествует формированию «порфирикового» оруденения. Причем существовал относительно длительный этап преимущественного развития эпитермальных месторождений. Учитывая структурно-динамические условия развития данного типа месторождений [White et al., 1971; Шаропов, 2010; Шаропов и др., 2012б], этот результат представляется неожиданным. Мы пока не нашли объяснения данному феномену. Возможно, проблема заключается в особенностях тектонической истории вулканических поясов Южного и Северного островов Новой Зеландии [Craw et al., 2003]. Скорее можно ожидать другой тип вариаций, который следует из существования последовательного совмещения сульфидных и эпитермальных стадий на отдельных месторождениях других секторов ТО [Петренко, 1999; Muntean, Einaudu, 2001; Richards, 2005; и др.]. Для месторождений ВПМ западных окраин Северной и Южной Америки распределения частот данных объектов выглядят иначе, чем для Новой Зеландии (рис. 5). Поэтому естествен вопрос, существуют ли периодичности в образовании отдельных металлогенических типов в «порфириковой формации» (англоязычная систематика) или в формационных рядах (русскоязычная систематика). Из анализа данных рис. 3 можно заключить, что эти ряды для западной окраины Северной Америки различаются как по временным интервалам преобладания максимумов проявления, так и по распределениям временных интервалов, в которых месторождения не формировались.

В свете сопоставления распределения частот появления эпитермальных и порфириковых месторождений заслуживает внимания более последовательное исследование периодичности формирования металлогенических рядов ВПМ «порфириковой формации», чем построение интервалов их проявления, приведенное на рис. 3. В табл. 3 суммированы данные оценки периодичности появления на западной окраине Северной Америки тех металлогенических типов ВПМ, для которых известны достаточные выборки данных. Они соотношены с периодичностью формирования рудоносных магматических комплексов и проявления процессов рудообразования на территории Хребтов и Бассейнов. Обсудим прикладные следствия выполненного анализа.



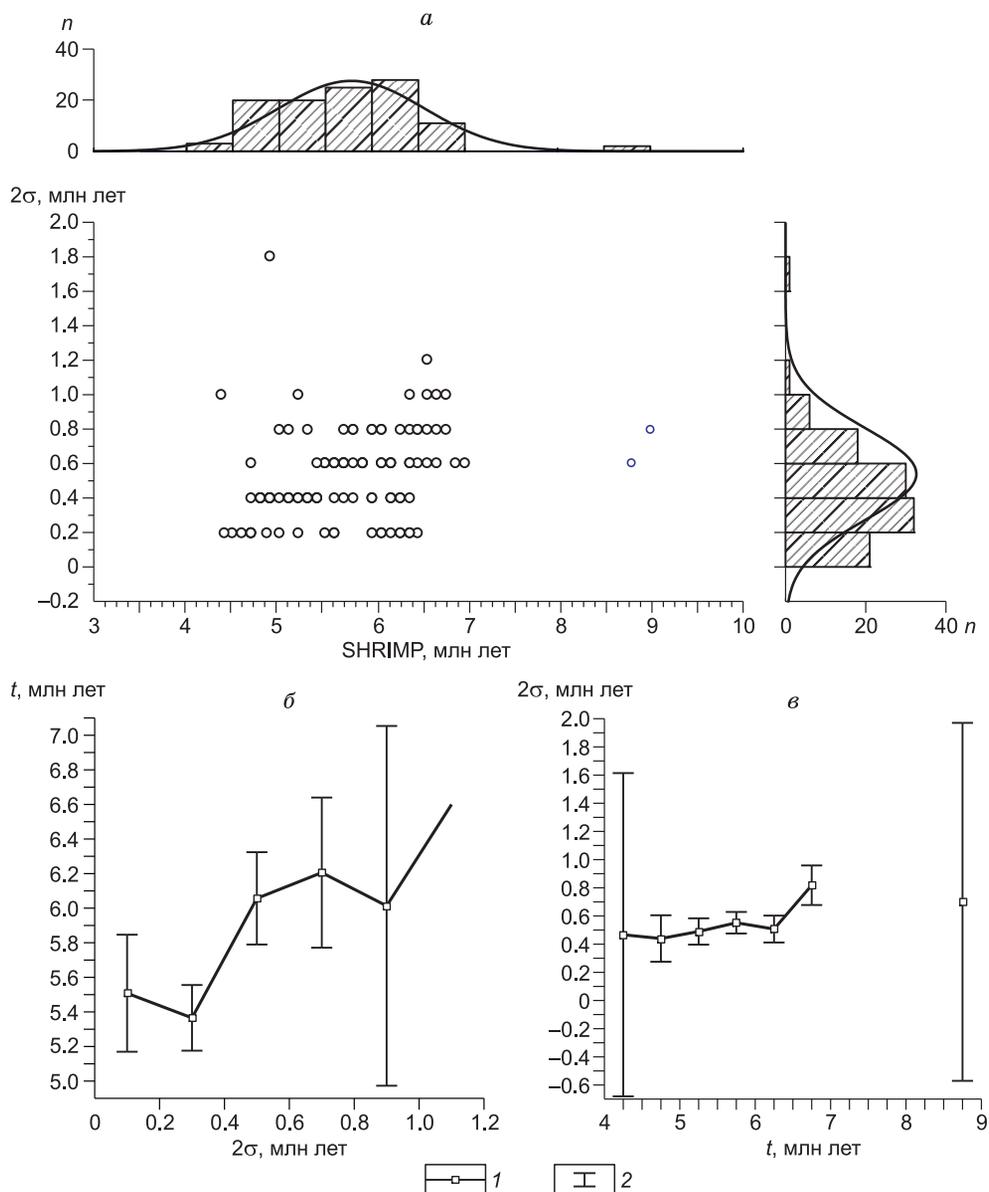
**Рис. 5.** Распределение на временной линейке частот появления эпитермальных (Ep) и порфириковых месторождений (Pf) на западных окраинах Северной Америки (*a*), Южной Америки (*б*).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состоятельность приведенных выше оценок периодичности развития РМС и длительности формирования ВПМ определяется как добротностью массивов числовой информации в отношении инструментальных определений конкретных дат магматогенных событий, так и методов анализа построенных временных рядов с прерываниями. О методологии обработки данных говорилось выше. Учитывая, что основной массив информации получен на основе К-Аг датировок, то в приложениях, по-видимому, наибольшие сомнения в полученных оценках связаны с низкочастотными областями временных рядов конкретных ВПМ и РМС. Большая часть этой информации относится к временным отрезкам менее 20 млн лет. Поэтому важно просмотреть данные, полученные более чувствительными методиками, обладающими значительно меньшими погрешностями при датировании магматогенных событий. Для этих случаев в последнее десятилетие используется комплекс методик: SHRIMP U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Re-Os [Интерпретация..., 2001]. Обзор этих результатов есть в работе [Sillitoe, Martesen, 2010]. Прикладная реализация такой комплексной информации сопряжена с рядом формальных и содержательных затруднений. Существование проблемы сводится к тому, какие оценки динамики реальных магматогенных процессов можно получить с помощью этих методов.

Характерный случай такого анализа в отношении оценки длительности и стадийности формирования ВПМ удобно обсудить на примере высокопрофессионально исследованного месторождения Эль Тениенте в Чилийских Андах [Maskaev et al., 2004; Muñoz et al., 2012]. Месторождение представляет собой субвулканические этажи эродированной приблизительно до глубины 2 км кальдеры, сформировавшейся в миоценовой вулканогенной толще ( $dt = 12 \pm 0.7 \div 6.6 \pm 0.4$  млн лет). Рудоносный магматический комплекс представлен пятью фазами: 1) штоки кварцевых диорит-тоналитов ( $dt = 6.46 \pm 0.11 \div 6.11 \pm 0.13$  млн лет), 2) штоковидное тело кварцевых диорит-тоналитов ( $dt = 5.63 \pm 0.12 \div 5.47 \pm 0.12$  млн лет), 3) дацитовых порфиров ( $5.28 \pm 0.1$  млн лет), 4) кольцевая дайка дацитов ( $4.82$  млн лет), 5) мелких даек дацитов ( $4.58 \pm 0.1$  млн лет). Рудные тела секутся дайками андезитов ( $3.85 \pm 0.18$  млн лет). Датировка этих событий проведена двумя методами — U-Pb (циркон) и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (биотит и амфибол). Эти интрузивные фазы сопровождалась высокотемпературными гидротермальными процессами ( $T > 350$  °C, биотитизация и серититизация вулканогенных и интрузивных пород), а также формированием кварцевых жил, рудных брекчий и прожилково-вкрапленной минерализации. Первые датированы  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (биотит, серицит), вторые — Re-Os (сульфиды). Это означает, что даты, полученные первым методом, регистрируют эпизоды развития околорудных пород, тогда как второй метод фиксирует отложение сульфидной минерализации. Уже только отсюда получается достаточно существенное расхождение дат: для формирования околорудных пород фиксирован период  $5.06 \pm 0.12 \div 4.37 \pm 0.1$  млн лет с тремя эпизодами длительностью порядка  $0.69 \pm 0.22$  млн лет, тогда как сульфидное оруденение имеет стадии: 1)  $6.3 \pm 0.03$  млн лет, 2)  $5.6 \pm 0.02$  млн лет, 3)  $5.01 \div 4.96$ , 4)  $4.89 \pm 0.08 \div 4.78 \pm 0.03$ , 5)  $4.42 \pm 0.02$  млн лет. При этом формирование кальдеры, центральная часть которой фиксирована диатремой, а листрические сбросы — кольцевой и дацитовыми дайками, возникла, по-видимому, около  $4.83$  млн лет и существовала как высокопроницаемый флюидопроводник до  $\sim 4.36$  млн лет. Если провести несложные арифметические вычисления, то по разным методикам можно получить оценки интервалов времен, которые совпадут с указанными низкочастотными периодами региональных временных рядов, которые проанализированы на основе менее точного метода. Формально казалось бы проблема полихронности формирования ВПМ решается удовлетворительно [Sillitoe, Martesen, 2010]. Но при более полном анализе исходных данных, которые приведены в таблицах этой и других работ, возникает ряд вопросов относительно извлекаемых из них дат, исходных измерений и их интерпретации.

На рис. 6, а приведены соотношения оценок средних и стандартных отклонений для возрастов изверженных пород по цирконам (SHRIMP U-Pb). По условию получения и обработки инструментальных данных имеем дело со смешанными нормальными распределениями тех и других величин. На рис. 6, б показаны вычисленные значения средних и доверительных интервалов их определения для данной нормированной погрешности определения дат. Они сопоставлены с оценками средних из работы [Maskaev et al., 2004] в табл. 5 (по цирконам). Несложно понять, что расхождения оценок, полученных по стандартной методике расчета средних для полученных в экспериментах норм погрешностей, приведенных нами, и данными авторов, работы связано с тем, что разбраковки выборок по визуальным характеристикам строения зерен приводят к смещению измерений с разными погрешностями при расчете средних. Подобная картина обнаруживается и при обработке данных средних возрастов, полученных по минералам из гидротермально измененных пород. Мы аналогичным образом обработали результаты датирования интрузивных фаз рудоносного магматического комплекса месторождения Квелловеко в [Sillitoe, Martesen, 2010] для приведенных в работе рядов измерений. Разница между интерпретационными результатами первой и второй работы состоит в том, что во второй из них авторы отсекали резко отклоняющиеся изменения в краевых частях рассматриваемых временных рядов для древних возрастов. Отсюда несколько меньшая вариативность оценок возрастов при сравнении с расчетами, учитывающи-



**Рис. 6. а** — диаграмма рассеивания средних возрастов и погрешностей их определения для изверженных пород рудоносного магматического комплекса (SHRIMP U-Pb),  $n = 120$  определений; **б** — оценки средних возрастов изверженных пород и доверительных интервалов их определения по нормально распределенным погрешностям; **в** — оценки значений погрешностей определения средних возрастов по нормально распределенным значениям средних возрастов.

1 — значения, 2 — доверительный интервал.

ми нормальность распределений погрешностей измерений. Обращают на себя внимание систематические отклонения при определении возрастов в краевых частях кристаллов, которые примерно в два раза больше таковых в центральных частях зерен циркона. Можно полагать, что дело не в недостатках метода измерения, а в особенностях вариаций концентрационного переохлаждения в кристаллизационных ячейках при направленной кристаллизации магматических тел [Черепанова и др., 2009], которые дополняются изменениями состава кристаллов циркона при метасоматической переработке изверженных пород высокотемпературными магматогенными флюидами [Maskaev et al., 2004; Sillitoe, Martensen, 2010; Muñoz et al., 2012]. Таким образом, получаемые оценки продолжительности стадий магмо- и рудообразования — не более, чем отдельные смещенные сверху оценки некоторых дат, генетическая содержательность которых требует дополнительного анализа. Очевидно, что вычисляемые перерывы (или ста-

дии процессов) по указанному комплексу измерений реально не дают отсечек начала или конца отдельных длительностей процессов рудообразования или перерывов между фазами интродуирования [Maskaev et al., 2004; Sillitoe, Martensen, 2010]. Следовательно, пока нет инструментов для установления продолжительности отдельных стадий циклических процессов формирования полихронных ВПМ. Используемый комплекс методик позволяет более уверенно, чем К-Аг методом, оценивать общую длительность формирования ВПМ [Sillitoe, Martensen, 2010].

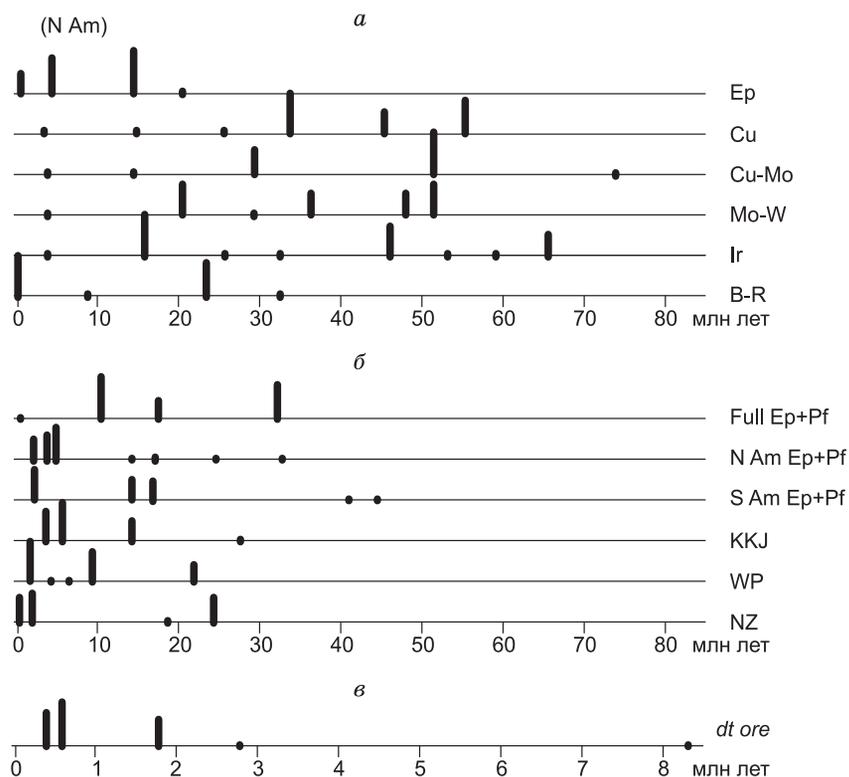
Кроме того, статистический анализ этих данных позволяет ввести представления о реализации в РМС вулканических дуг моно- и полициклических ВПМ. Первые описываются канонической схемой (см. рис. 1). Существующие методы датирования позволяют оценивать длительность формирования РМС менее 1 млн лет. Примерами таких объектов могут быть месторождения: Поргепа [Cathles et al., 1997; Ronacher et al., 2004], Раунд Маунтин [Henry et al., 1997]. Портериллос [Marsh et al., 1977] и др. Полициклические ВПМ представляют собой пространственное совмещение ряда реализаций, показанных на рис. 1. К такого рода объектам следует относить упомянутые выше андийские месторождения Южной Америки и объекты, типа описанных в [Steininger, 1985; Cartten et al., 1988; Redmond, Einaudi, 2010] в Северной Америке. Протяженность формирования такого рода РМС ограничивается одной металлогенической эпохой, отвечая, по-видимому, ее последовательным фазам. За время 2—3 млн лет скорости эрозии, судя по оценкам [Gunnell et al., 2010; Karatson et al., 2012], в отдельных случаях мало меняют уровни и структурные условия разгрузки гидротермальных систем. Вторым типом полициклических ВПМ, по-видимому, следует считать пространственное совмещение продуктов РМС разных стадий одной или нескольких металлогенических эпох. Первые описаны в Северной и Южной Америке [Geology..., 2009; Chen et al., 2010], вторые, скорее, характерны для зон активизации внутриплитных глубинных разломов [Сотников, 2006].

Основной прикладной аспект проведенного статистического анализа состоит в генетической трактовке периодичности циклического процесса формирования РМС на активных окраинах ТО. Статистический анализ дат рассматриваемых событий на активных окраинах ТО при кажущейся значительности числа определений (более 1000) обнаруживает в указанном отношении лишь относительную достаточность информации. Дело состоит в том, что таким образом охарактеризована примерно третья часть от разведанных ВПМ, внесенных в использованные нами базы данных. Опубликованная числовая информация в более поздних публикациях не меняет общей картины. Поэтому приведенные выше результаты можно рассматривать как первое приближение в количественной оценке периодичности проявления РМС в ряде сегментов окраин ТО. Действительно, большая часть дат относится к объектам эпиконтинентальных дуг Северной и Южной Америки. Месторождения эпиконтинентальных вулканических поясов восточных окраин Азиатского континента пока имеют настолько убогую датированность, что не представляется возможным даже понять, есть ли в них какие-то временные и пространственные тренды формирования ВПМ, не говоря о возможных видах периодичности их металлогенических типов. Практически такой же вывод можно сделать о данных для западного и южного секторов окраины ТО. Поэтому общие закономерности циклической периодичности РМС на всех окраинах ТО еще предстоит установить.

С другой стороны, изложенные данные комплексной статистической обработки временных рядов формирования ВПМ, количественно охарактеризованных активных окраин ТО, в рамках существующей понятийной базы сложны для содержательной генетической интерпретации. Обратимся к русскоязычной трактовке проблемы. Согласно геологическому словарю [Геологический..., 1973] и основной монографической работе по геологии рудных месторождений [Смирнов, 1969], которые цитируются в различных модификациях в энциклопедиях или учебных курсах, предлагаемых в Интернете, металлогенической эпохой считается некоторый отрезок геологического времени, которому отвечает интенсивное развитие рудообразования. В отношении рудообразования, связанного с магматическими процессами в земной коре, границы эпохи выделялись по фазам складчатости и назывались тектономагматическими циклами. Эпохи металлогенеза подразделялись на этапы (стадии), а последние — на фазы рудообразования. Эта понятийная база сложилась в рамках парадигмы этапов развития геосинклиналей. В рамках постулатов «террейновой» схемы в тектонике активных окраин океанических плит вулканические дуги (пояса) относятся к элементам зон квазистационарного субдупирования океанических плит и толкуются как поверхностные надсубдукционные вулканические комплексы. В этой теории вообще нет содержательных соображений о цикличности возникновения и отмирания вулканических дуг, как и нет выделения циклических металлогенических эпох и более мелких их подразделений. При первоначальной формулировке понятия «металлогеническая эпоха» [Геологический..., 1973] была введена качественная мера — интенсивность. В более поздних толкованиях использовались и ее лексические эквиваленты. Что конкретно отвечает этому соображению в отношении числа месторождений, общего тоннажа запасов металлов и т.п. ни одним из авторов, использовавших эти понятия, в известных нам публикациях не поясняется.

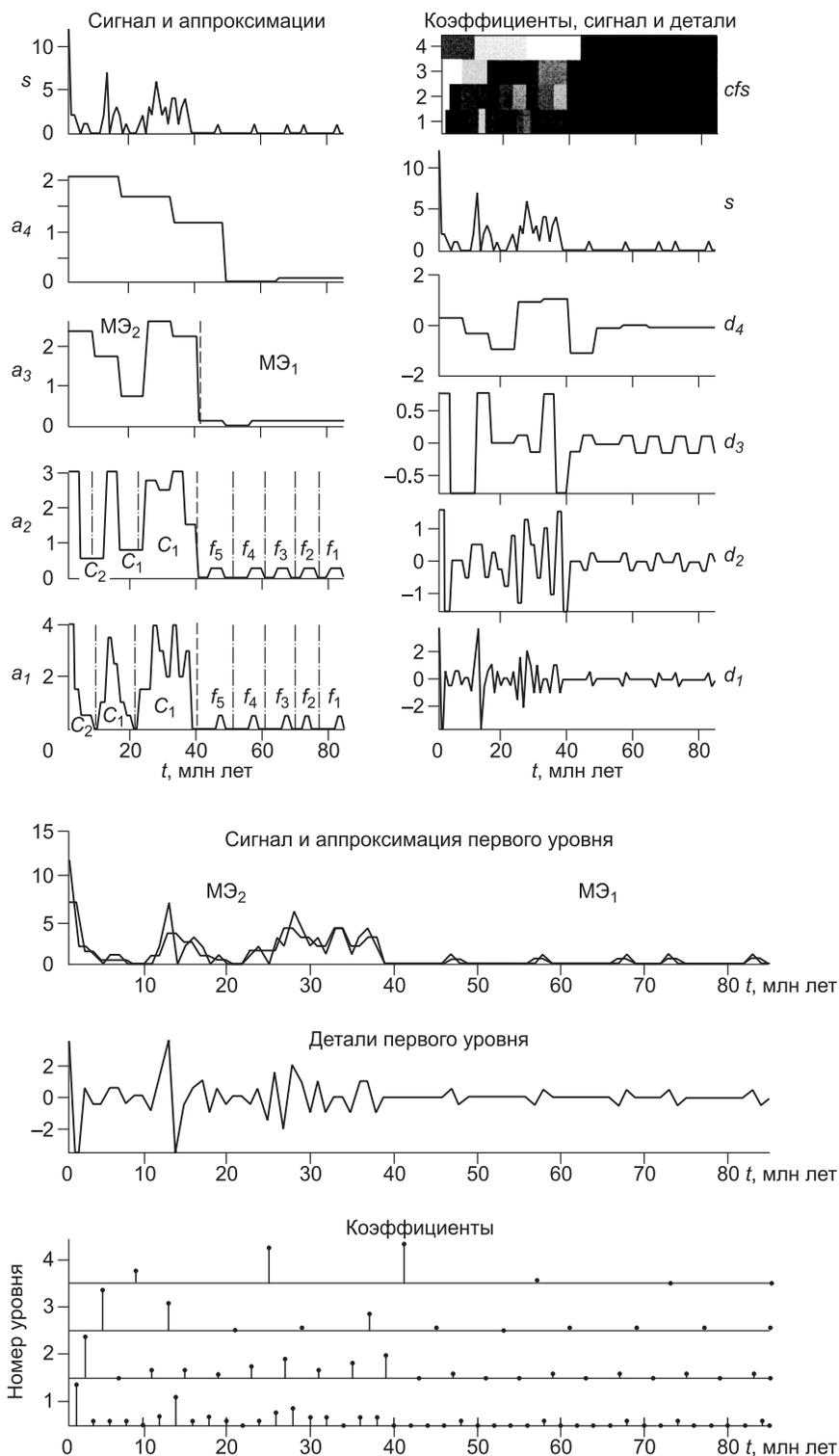
Поэтому пока не возникнет содержательная теоретическая схема, описывающая периодическую цикличность развития вулканических дуг на активных окраинах ТО, рационально использовать эмпирический подход. Им может быть событийно-нормированный подход к описанию металлогенических эпох и их стадий, предложенный в [Wilkinson, Kesler, 2009]. Нам эта идея представляется пока наиболее содержательной, будем считать «металлогенической эпохой» период времени (геологической истории), в котором реализовано существенно большее количество месторождений некоторого генетического типа, чем в среднем количестве месторождений данного типа, возникших на Земле в последние ~ 545 млн лет. Поскольку средняя норма металлогенеза по рассматриваемым нами месторождениям пока не построена, зафиксируем эмпирический материал, который удалось формализовать. Без известной нормы выделения металлогенических эпох (МЭ) обратимся к возможности выделения МЭ на послепалеозойской геологической истории окраин ТО на основе Фурье-преобразований и вейвлет-анализа временных рядов. Будем рассматривать формирование конкретных объектов (месторождений) с учетом частоты их появления на временной линейке при поясовом распределении объектов в пространстве на активных окраинах ТО:

1) магматические рудоносные комплексы проявились с низко-, средне- и высокочастотной периодичностью (см. табл. 4), 2) периодичность формирования временных рядов ВПМ содержит порядка четырех гармоник (см. табл. 2), 3) отдельные металлогенические типы ВПМ (см. рис. 3) имеют собственную периодичность (см. табл. 3), 5) полихронные месторождения обладают рядами событий с периодичностью, не совпадающей с периодичностью рядов ВПМ. Эти результаты обобщены на рис. 7. Они позволяют конкретизировать идею [Wilkinson, Kesler, 2009] для окраин ТО в отношении выделения металлогенических эпох (МЭ) и принятых их подразделений: а) высокочастотные характеристики спек-



**Рис. 7. Обобщенная схема значений определения периодичностей дат формирования РМС и ВПМ активных окраин Тихого океана (метод ARIMA), содержащихся в табл. 3, 4.**

а — периодичности формирования ВПМ на западной окраине Северной Америки (N Am), Ep — эпитермальные ВПМ, Cu — медно-порфировые ВПМ, Cu-Mo — медно-молибденовые ВПМ, Mo-W — молибденовые ВПМ с сопутствующей вольфрамовой минерализацией; Ir — магматические рудоносные комплексы района Хребтов и Бассейнов В-Р (США); B-R — периодичность формирования ВПМ района Хребтов и Бассейнов. б — характеристики периодичности развития РМС активных окраин Тихого океана: Full Ep + Pf — сумма дат эпитермальных и других металлогенических типов ВПМ, N Am Ep + Pf — аналогично для западной окраины Северной Америки, S Am Ep + Pf — аналогичные данные для Южной Америки, KKJ — ВПМ восточной окраины Азии, Камчатки, Курильских и Японских островов, WP — западная окраина ТО, NZ — новозеландские ВПМ. в — значения периодичностей длительности формирования месторождений (*dt ore*).



**Рис. 8. Разложение с помощью вейвлета Хаара временного ряда формирования месторождений района Хребтов и Бассейнов.**

Металлогеническая интерпретация результатов разложения содержится в тексте.  $a$  — отдельные моды разложения временного ряда формирования ВГМ района Хребтов и Бассейнов;  $cfs$  — коэффициенты разложения,  $s$  — исходный сигнал,  $d$  — уровни разложения сигнала,  $a_{1-4}$  — коэффициенты уровней разложения,  $C$  — стадии металлогенической эпохи (МЭ),  $f$  — фазы МЭ, штриховая линия — граница начала МЭ, штрихпунктирные линии — границы стадий МЭ.  $b$  — детали первого уровня разложения исходного сигнала и вид его аппроксимации, детальные коэффициенты всех уровней разложения исходного сигнала.

тра логично использовать для выделения МЭ, б) среднечастотные его данные — для определения стадий МЭ, в) низкочастотные части можно относить к характеристикам фаз МЭ.

В таком случае, в первом приближении можно предложить следующие размерности: 1) МЭ имеют размерность периодов ~ 17, 30, 40, 50 млн лет, 2) периодам ЭМ отвечают длительности 5—14 млн лет, 3) длительности фаз периодов МЭ 0.3—3.0 млн лет. Учитывая неоднородность плотностей частот на разных частях временной линейки, при таком подходе для конкретных регионов анализ длительности МЭ и его подразделений, а также характера направленности развития РМС и т.п., анализ хроноструктуры временных рядов ВПМ наиболее продуктивно выполнять с использованием вейвлет-анализа. Учитывая относительную кратковременность геологической истории ряда вулканических дуг на западных окраинах ТО для этой цели описания МЭ нами использован вейвлет Хаара. Покажем содержательность такого подхода на примере анализа «металлогенической хроноструктуры» района Хребтов и Бассейнов, геологические и геофизические характеристики которого приведены в [Hildenbrand et al., 2000; Lerch et al., 2008; Colgan et al., 2008] (рис. 8). Как следует из данной аппроксимации, в этом регионе просматривается два типа металлогенеза: а) периодическое проявление отдельных фаз металлогенических эпох, более широко проявляющихся в северных и южных регионах в интервале 90—40 млн лет; б) достаточно широкое проявление последней МЭ 40—0 (н/в) млн лет. В ней в данном регионе реализовано три стадии, содержащих по 3—4 фазы. Такая картина наиболее четко просматривается на 1 и 2 уровнях разложения временного ряда. В третьем уровне разложения видна периодичность проявления рудоносных фаз, тогда как четвертый уровень разложения временного ряда фиксирует его разделение на две разных временных области металлогенеза, отвечающих, по-видимому, различным особенностями геодинамики развития активной окраины и РМС данного региона. Аналогичный анализ был проведен для всех временных рядов, отмеченных выше в таблицах и на рисунках. По существу эти данные являются графической иллюстрацией свертки числовой информации в приведенных выше таблицах. Из-за краткости сообщения и громоздкости графического материала эти результаты будут изложены в отдельной публикации. Поэтому здесь мы ограничимся кратким резюме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистический анализ длительности и цикличности развития вулкано-плутонических месторождений и рудопродуктивных магматических систем, охарактеризованных датами их реализации в геологической истории активных окраин Тихого океана, показывает: 1. В РМС вулканических дуг присутствуют моно- и полициклические ВПМ, существенно различающиеся длительностями формирования. 2. Главной особенностью хроноструктуры РМС является периодичность их развития на постпалеозойском отрезке геологической истории континентальных окраин Тихого океана. 3. Временные ряды РМС разных секторов окраин ТО обладают подобием периодичностей, но различаются фазами и амплитудами проявлений МЭ на одинаковых отрезках временных линейек, что особенно заметно в последние 30 млн лет. 4. Разные металлогенические ВПМ обладают собственной периодичностью. 5. Периодичность длительностей формирования моно- и полициклических ВПМ отличается от таковой во временных рядах ВПМ.

Генетическая интерпретация полученных характеристик длительности и периодичности развития РМС и сопряженных с ними ВПМ может быть построена на количественной неизотермической гидродинамике мантийно-коровых рудно-магматических систем. Эти трактовки будут предложены в отдельном сообщении.

Авторы признательны А.С. Борисенко, Н.А. Горячеву, Н.Л. Добрецову, М.П. Мазурову, Ю.В. Перепечко, В.А. Пономарчуку, И.Р. Рахменкуловой, А.А. Томиленко и анонимному рецензенту рукописи за обсуждение, критику и конструктивные предложения по рассматриваемым в работе вопросам.

## ЛИТЕРАТУРА

**Геодинамика**, магматизм и металлогения востока России / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток, Изд-во ДВО РАН, 2006, кн. 1, 572 с.

**Геологический словарь**. М., Недра, 1973, 456 с.

**Добрецов Н.Л.** Периодичность геологических процессов и глубинная геодинамика // Геология и геофизика, 1994, т. 35, № 5, с. 5—19.

**Интерпретация геохимических данных** / Ред. Е.В. Складов. М., Интермет Инжиниринг, 2001, 287 с.

**Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С.** Медно-порфировые месторождения мира. М., Недра, 1986, 236 с.

**Малиновский Л.Г.** Анализ статистических связей: модельно-конструктивистский подход. М., Наука, 2002, 683 с.

- Модельный анализ** развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем / Ред. Г.В. Поляков. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, 399 с.
- Овчинников Л.Н.** Образование рудных месторождений. М., Недра, 1988, 252 с.
- Петренко И.Д.** Золото-серебряная формация Камчатки. СПб., ВСЕГЕИ, 1999, 116 с.
- Пономарчук В.А.** Геохронологические ( $^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$  и Rb-Sr) и изотопно-геохимические ( $^{87}\text{Sr}^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) параметры Cu-Mo-порфировых рудных узлов (Сибирь, Монголия): Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Новосибирск, 2005, 40 с.
- Поспелов Г.Л.** Строение и развитие фильтрующихся гидротермальных рудообразующих систем // Геология и геофизика, 1962, ч. I (11), с. 28—40; ч. II (12), с. 40—57.
- Сидоров А.А., Старостин В.И., Волков А.В.** Рудноформационный анализ. М., МАКС Пресс, 2011, 180 с.
- Смирнов В.И.** Геология полезных ископаемых. М., Недра, 1969, 685 с.
- Смоленцев Н.К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М., ДМК Пресс, 2005, 304 с.
- Сотников В.И.** Медно-молибден-порфировая формация: природа, проблема объема и границ // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (3), с. 342—354.
- Черепанова В.К., Черепанов А.Н., Шаратов В.Н., Плаксин С.И.** Динамика неизотермической ритмической солидификации котектических расплавов // Геохимия, 2009, № 5, с. 481—489.
- Шаратов В.Н.** Влияние структурно-динамических условий разгрузки гидротермальных вулканических систем на рудообразование в их недрах // Докл. РАН, 2010, т. 432, с. 396—402.
- Шаратов В.Н., Аверкин Ю.А.** Динамика тепло- и массообмена в ортомагматических флюидных системах. Новосибирск, Наука, 1990, 198 с.
- Шаратов В.Н., Черепанов А.Н., Попов В.Н., Быкова В.Г.** Математическая модель 2D динамики теплообмена во флюидных системах при сосредоточенном стоке магматического флюида в локальные трещинные зоны над кровлей кристаллизующихся интрузивов // Физика Земли, 2012а, № 11—12, с. 79—90.
- Шаратов В.Н., Лапухов А.С., Гузман Б.В., Черепанова В.К.** Динамика фазовых границ в магматогенном флюиде при формировании золото-серебряных месторождений Южной Камчатки // Геология и геофизика, 2012б, т. 53 (9), с. 1095—1115.
- Шаратов В.Н., Черепанов А.Н., Попов В.Н.** Влияние неоднородностей строения верхней границы магматических тел под вулканами на формирование флюидных рудообразующих систем при ретроградном кипении расплава // Геохимия, 2013, № 10, с. 883—893.
- Шило Н.А., Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Ряховская С.К., Брызгалов И.А.** Минералогия и генетические особенности золото-серебряного оруденения северо-западной части Тихоокеанского обрамления. М., Наука, 1992, 257 с.
- Cathles L.M., Erendy A.H.J., Barrie T.** How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event? // Econ. Geol., 1997, v. 92, p. 766—771.
- Camp V.E., Ross M.E.** Mantle dynamics and genesis of mafic magmatism in the intermontane Pacific Northwest // JGR, 2004, v. 109, B08204, doi:10.1029/2003JB002838, 2004.
- Camp V.E., Ross M.E., Hanson W.E.** Genesis of flood-basalts and Basin and Range province rocks from Steens Mountain to the Malheur River Gorge, Oregon // Bull. Geol. Soc. Amer., 2003, v. 115 (1), p. 105—128.
- Cartten R., Geraght N.P., Walker R.** Cyclic development of igneous features and their relationship to high-temperature hydrothermal features in the henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado // Econ. Geol., 1988, v. 83, p. 266—296.
- Chen Y., Clark A.H., Kyser T.K., Ullrich T.D., Baxter R., Moody T.C.** Evolution of the Giant Marcóna-Mine Justa iron oxide-copper-gold district, South-Central Peru // Econ. Geol., 2010, v. 105 (1), p. 155—186.
- Colgan J.P., John D.A., Henry C.D., Fleck R.J.** Large magnitude Miocene extension of the Eocene Caetano caldera, Shoshone and Toiyab Ranges, Nevada // Geosphere, 2008, v. 4 (1), p. 107—130.
- Condie K.C.** Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge, Cambridge University Press, 2001, 306 p.
- Cooke D.R., Hollings P.** Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls // Econ. Geol., 2005, v. 100, № 5, p. 801—818.
- Craw D., Norton P.U., Williams J.** Migration of hydrothermal systems in an evolving collision orogen, New Zealand // Miner. Depos., 2003, v. 38 (7), p. 900—912.
- Dynamic** Computer model for the metallogenesis and tectonics of the Circum-North Pacific / Eds. W.J. Nokleberg, M.F. Diggels. U.S. Geological Sur. Open-File Report 01-261, version 1.0, 2001.

**Geology, geochemistry, and genesis of the Greens Creek massive sulfide deposit, Admiralty Island, southeastern Alaska / Eds. D.C. Taylor and C.A. Johnson. U.S. Geological Survey, Professional Paper 1763, Reston, Virginia, 2009, 729 p.**

**Groves D.I., Richard M., Vielreicher R.M., Richard J., Goldfarb R.J., Condie K.C.** Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time / Geological Society, London, Special Publications, 2005, v. 248, p. 71—101.

**Groves D.I., Bierlein F.P., Meinert L.D., Hitzman M.W.** Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, № 3, p. 641—654.

**Gunnell Ya., Thouret J.-C., Bricchau S., Carter A., Garllagher K.** Low-temperature thermochronology in the Peruvian Central Andes: implications for longterm continental denudation, timing of plateau uplift, canyon incision and lithosphere dynamics // *J. Geol. Soc.*, 2010, v. 167, № 4, p. 803—815.

**Henry C.D., Elson H.B., McIntosh W.C., Heizler M.T., Castor S.B.** Brief duration of hydrothermal activity at Round Mountain, Nevada, determined from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology // *Econ. Geol.*, 1997, v. 92, p. 807—826.

**Hildenbrand T.G., Berger B., Jachnes R.C., Ludington S.** Regional crustal structures and their relationship to the distribution of ore deposits in the Western United States, based on magnetic and gravity data // *Econ. Geol.*, 2000, v. 95, p. 1583—1603.

**Isley A.E., Abbott D.H.** Implications of the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time // *J. Geol.*, 2002, v. 110, p. 141—158.

**John D.A.** Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great Basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism // *Econ. Geol.*, 2001, v. 96, p. 1827—1853.

**Jordan B.T., Grunder A.L., Duncan R.A., Deino A.L.** Geochronology of age-progressive volcanism of the Oregon high lava plains: implications for the plume interaction of Yellowstone // *JGR*, 2004, v. 109, B10202, 19 p.

**Karatson D., Tilbisz T., Wölmer G.** Erosion rates and erosion patterns of Neogene to Quaternary stratovolcanoes in the Western Cordillera of the Central Andes: An SRMTM DEM based analysis // *Geomorphology*, 2012, v. 139—140, p. 122—135.

**Lerch S.W., Miller E.M., McWilliams M., Colgam J.** Tectonic and magmatic evolution of northwestern Basin and Range and its transition to unextended volcanic plateaus: Black Rock Range, Nevada // *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 2008, v. 120 (3—4), p. 300—311.

**Maskaev V., Munizaga F., McWilliams M., Fanning M., Mathur R., Ruiz J., Zentilli M.** New chronology for El Tenete, Chilean Andes, from U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Re-Os and fission-track dating: implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit / Eds. R.H. Sillitoe, J. Perelly, C.E. Vidal. Andean metallogeny: new discoveries, concepts and updates // *Soc. Econ. Geol., SEG Spec. Publ.* 11, p. 15—54.

**Muñoz M., Charrier R., Fanning C.M., Maskaev V., Deckart K.** Zircon trace element and O-Hf isotope analyses of mineralized intrusions from El Teniente ore deposit, Chilean Andes: evolution of porphyry Cu-Mo related magmas // *J. Petrol.*, 2012, v. 53 (6), p. 1091—1112.

**McQuarry N., Wernikel B.P.** An animated tectonic reconstruction of southwestern North America since 36 Ma // *Geosphere*, 2005, v. 1 (1), p. 147—172.

**Mamani M., Tassara A., Wörner G.** Composition and structural control of crustal domains in the central Andes // *G<sup>3</sup>*, 2008, v. 9, № 3, Q03006, doi: 10.1029/2007GC001925.

**Mamani M., Wörner G., Sempere T.** Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): tracing crustal thickening and magma generation through time and space // *GSA Bull.*, 2010, v. 122 (1/2), p. 162—182.

**Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine Orogen / Eds. B. Durand, L. Jolivet, F. Horvach, M. Seranne // Spec. Publ. 156. *Geol. Soc., Cambridge Press, Cambridge*, 1999, 541 p.**

**Moore G., Marone C., Carmichael S.F., Renne P.** Basaltic volcanism and extension near the intersection of Sierra Madera volcanic province and the Mexico volcanic belt // *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1994, v. 106 (3), p. 383—394.

**Muntean J.L., Einaudi M.T.** Porphyry-epithermal transition: Maricunga Belt, Chile // *Econ. Geol.*, 2001, v. 96 (4), p. 743—772.

**Pirajno F.** Hydrothermal processes and mineral deposits. Springer. Part of Springer Science+Business Media, 2009, 1250 p.

**Prokoph A., Ernst R.E., Buchan K.L.** Time-series analysis of Large Igneous Provinces: 3500 Ma to Present // *J. Geol.*, 2004, v. 112, p. 1—22.

**Rampino M.R., Caldeira K.** Major episodes of geologic change: correlations, time, structure and possible causes // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, v. 114, p. 215—227.

**Redmond P.B., Einaudi M.T.** The Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. Sequence of intrusions, vein formation, and sulfide deposition // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105 (1), p. 43—68.

**Richards J.P.** Tectonomagmatic controls on porphyry and epithermal mineralization in the Central Andes // *Mongolian Geoscientist*, 2005, № 27, p. 46—47.

**Richards J.P.** Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and colliding margins // *Geol. Rev.*, 2011, v. 40, p. 1—26.

**Richards J.P., Boyce A.J., Pringle M.S.** Geologic evolution of the Escondida Area, Northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization // *Econ. Geol.*, 2001, v. 96, № 2, p. 271—305.

**Roperch P., Carlotto V., Chauvin A.** Block rotations within the Northern Peruvian Altiplano // 7th Int. Symp. Andean Geodynamics (ISAG — 2008, Nice), Extended abstracts. Nice, 2008, p. 469—472.

**Ronacher E., Richards J.P., Reed M.H., Bray C.J., Spooner E.T.C., Adams P.D.** Characteristics and evolution of the hydrothermal fluid in the north zone high grade area, Porgera gold deposit, Papua New Guinea // *Econ. Geol.*, 2004, v. 99, p. 843—867.

**Schutt D.L., Dueker K., Yuan H.** Crust and upper mantle velocity structure of the Yellowstone hot spot and surroundings // *J. Geophys. Res.*, 2008, v. 113, B03310, 14. doi:10.1029/2007 JB005109.

**Sillitoe R.H.** Porphyry copper systems // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, № 1, p. 3—41.

**Sillitoe R.H., Martensen J.** Longevity of porphyry copper formation at Quellaveco, Peru // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 1157—1162.

**Sinclair W.D.** Geological Survey of Canada. Mineral deposits of Canada: porphyry deposits. Open-File /[http://gscnrcan.gc.ca/mindep/synth\\_dep/porph/index\\_e.php/2008](http://gscnrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/porph/index_e.php/2008).

**Singer B.S., Jicha B.J., Harper M.A., Narinjo J.A., Lara L.E., Moreno-Roa H.** Eruptive history and magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex, Chile // *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 2005a, v. 120 (506), p. 559—618.

**Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C.** Porphyry copper deposits of World database, maps and preliminary Analysis. An updated version in US GS Open-File Report 2005-1060, 2005b. (<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1060>).

**Steininger R.C.** Geology of the Kitsault molybdenum deposit, British Columbia // *Econ. Geol.*, 1985, v. 80, p. 57—71.

**Thomson B., Aftalion M., McIntyre R.M., Rice C.** Geochronology and tectonic setting of silicic dike swarms and related silver mineralization at Candelaria, Western Nevada // *Econ. Geol.*, 1995, v. 90, p. 2182—2196.

**Wilkinson B.H., Kesler S.E.** Quantitative identification of metallogenic epochs and provinces: application to Phanerozoic porphyry copper deposits // *Econ. Geol.*, 2009, v. 104, № 5, p. 607—622.

**White W.S., Muffler L.J.P., Truesdell A.H.** Vapor-dominated hydrothermal systems compared with the hot-water system // *Econ. Geol.*, 1971, v. 66, № 1, p. 75—97.

*Рекомендована к печати 26 декабря 2012 г.  
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию  
9 августа 2012 г.*