



УДК 553.463:553.06

© 2008

В. Н. Воеводин

## Условия рудогенеза вольфрама в различных геологических средах

(Представлено академиком НАН Украины Е. А. Кулишом)

*Experimental data accumulated up to this time allow one to revise and to expand notions on the tungsten ore genesis conditions and metallogeny. Besides the traditionally known industrial deposits associated with granitoid magmatism, it is possible to pick out the basaltfilling mineralization revealed in the structures of basite-ultrabasite magmatism. It is necessary to attract attention to the metamorphogenic mineralization (scheelite-bearing quartzites, skarnoides, tactites). By the example of foreign countries, its potential industrial significance is determined. All these genetically heterogeneous ore formations have different conditions and the mechanism of formation and are referred to many-type geotectonic structures.*

В теории рудогенеза вольфрама доминируют представления о его литофильном характере и преимущественной связи с гранитоидным магматизмом. Представления базируются на длительном изучении промышленных вольфрамовых, олововольфрамовых, вольфраммолибденовых, вольфрамполиметаллических месторождений, отчетливо ассоциирующих с гранитоидным магматизмом; приурочены к орогенным поясам геосинклинально-складчатых систем и к зонам тектономагматической активизации. В большинстве известных классификаций вольфрамового оруденения в виде различных таксономических единиц (формации, ряды формаций, субформации и т. п.) выделяются представители олововольфрамового, вольфраммолибденового и вольфрамполиметаллического оруденения, имеющие более-менее отчетливую связь с гранитоидным магматизмом, так называемые золотовольфрамовая (золотошеелитовая) и ртутно-сурьмяновольфрамовая формации, генезис которых остается дискуссионным, а вопрос связи оруденения с магматизмом однозначно не решенным. Кроме того, давно известно вольфрамовое стратиформное метаморфогенно-гидротермальное оруденение: скарноиды, тактиты, шеелитоносные кварциты, а также седиментогенно-метаморфогенно-гидротермальные объекты не совсем ясного генезиса. В классификациях вольфрамового оруденения они не отражены, не ясен даже их таксономический ранг.

Результаты геологоразведочной практики свидетельствуют о значительно большем разнообразии вольфрамовой минерализации, а также приуроченности к самым различным

геотектоническим структурам. Регулярно выявляется вольфрамовая минерализация в нехарактерной для нее геологической обстановке. Стали многочисленными примеры нахождения данной минерализации в структурах базит-гипербазитового магматизма на площадях отсутствия гранитоидного магматизма или резко угнетенного его проявления, что невозможно объяснить случайным пространственным совмещением или наличием нескрытых эрозией гранитных тел. Причем вольфрамовые минералы стали отмечаться в нетипичных для вольфрама генетических типах оруденения — в первично-магматических, карбонатах, лиственитах и т. д.

В связи с этим возникает необходимость пересмотра устоявшихся представлений в теории рудообразования об условиях и механизме формирования вольфрамового оруденения в различных геологических средах, и, соответственно, его систематики и металлогенических построений.

Анализ и обобщение новых материалов по нестандартному проявлению вольфрамовой минерализации [1] позволяет ставить вопрос о пересмотре и расширении ныне существующих представлений по рудогенезу вольфрама. Это касается подразделения эндогенного магматогенного оруденения на две крупные генетические субсерии: 1) гранитофильную, традиционно известную и наиболее полно изученную, и 2) базальтофильную, ранее считавшуюся “запрещенной ассоциацией” для вольфрамового оруденения. Каждая из этих генетических субсерий имеет различные источники магматического и рудного вещества, характеризуется разным геохимическим профилем оруденения, минеральным составом и набором слагающих их генетических типов. Кроме этого, назрела необходимость выделения в самостоятельный таксономический ранг в виде метаморфогенной серии вольфрамового оруденения, проявляющегося в скарноидах, тактиках, кварцитах и т. п.

Обобщенная схема генетической систематики (классификации) вольфрамового оруденения, учитывающая все его многообразие, представлена в табл. 1 (\*\* — ведущее промышленное значение, \* — возможны повышенные концентрации и промышленные месторождения, \* — преимущественно рассеянные накопления):

*Гранитофильная субсерия* наиболее хорошо изучена. По этому оруденению имеется весьма обширная библиография. В настоящее время имеет ведущее промышленное значение, в особенности скарны, гидротермальные, грейзены.

*Базальтофильная субсерия* изучена весьма слабо. В литературе преобладают разрозненные сведения о конкретных проявлениях в различных регионах; обобщающие работы редки. На примере Боливии, США, Китая, Забайкалья устанавливается их потенциальная промышленная значимость [1].

*Метаморфогенная серия* вольфрамового оруденения известна довольно давно. Имеется достаточное количество публикаций как по конкретным объектам, так и обобщаю-

Таблица 1

| Серия                         | Субсерия        | Генетические типы   |
|-------------------------------|-----------------|---|
| Магматогенная<br>(эндогенная) | Гранитофильная  | ***Гидротермальный, ***грейзеновый, ***скарновый,<br>**альбититовый, ***пегматитовый  |
|                               | Базальтофильная | **Телетермальный, колчеданный — ? **гидротермальный,<br>**лиственитовый, **родингитовый, **карбонатитовый,<br>**магматический |
| Метаморфогенная               |                 | **Кварцитовый, **тактитовый, **скарноидный  |
| Седиментогенная               |                 | *Вулканогенноосадочный, *хемогенный, *механический  |

ших работ. Однако степень ее изученности нельзя признать высокой. По этому оруденению нет единства мнений, не установлены все его разновидности (типы), большой разницей в терминологии (его именуют метаморфогенно-метасоматическим, седиментогенно-метаморфогенным, седиментогенно-метаморфогенно-гидротермальным, эксгальционно-метаморфогенным и т. п.), отсутствует какая-либо его систематика, не установлен таксономический ранг как всей серии (генетической группы), так и отдельных генетических типов (речь идет только о метаморфогенном оруденении вольфрама, а не вообще о метаморфогенном оруденении). Представляется целесообразным отказаться от двух-трехсложных наименований для такого оруденения, которые не несут определенной генетической смысловой нагрузки, а, в соответствии с существующим общепринятым подразделением всего многообразия рудных объектов, выделить на три генетические серии подобное оруденение в самостоятельную метаморфогенную серию. Тем более, что метаморфогенное рудообразование сопровождается и метасоматозом и гидротермальной деятельностью. И уже в рамках метаморфогенной серии классифицировать все многообразие рудных объектов. Ряд специалистов [2, 3 и др.] довольно обоснованно отмечают возможность формирования регенерированных месторождений вольфрама и золота при последующем гранитоидном магматизме за счет седиментогенных образований и скарноидов.

*Седиментогенная серия.* В различных регионах во многих разновидностях осадочных и вулканогенно-осадочных пород в основном геохимическими методами устанавливаются повышенные содержания вольфрама. Однако это вольфрамонакопление носит преимущественно рассеянный характер.

Перейдем к обоснованию предложенной систематики. Полную последовательность циклов рудообразования для редкоблагороднометального оруденения во многих случаях можно представить в следующем виде: седиментация, эпигенетические и катагенетические изменения → метаморфизм → магматизм → гипергенез [4]. В ходе этого процесса оруденение может обособляться в месторождения на любом цикле. Т.е. для конкретного месторождения решающим является один цикл. Это наглядно иллюстрируется на примере золотовольфрамовой (золотошеелитовой) формации, когда оруденение в одних случаях локализуется в метаморфизованных породах в амагматических структурах, в других — приурочено к малым интрузивным телам (дайки, штоки) преимущественно среднего состава, в третьих — к гранитоидным плутонам [5]. Более концентрированное оруденение мы вправе ожидать в тех случаях, когда процесс рудообразования прошел все циклы, т.е. седиментогенного и метаморфогенного рудонакопления, и завершился магматизмом, что способствовало более глубокой дифференциации и сепарации рудного вещества.

Рассеянные накопления вольфрама отмечаются в геосинклинальный этап и устанавливаются для осадочных и вулканогенно-осадочных толщ как мио-, так и эвгеосинклинального комплексов. Обогащение вольфрамом различных горизонтов разрезов неравномерное. Значительные вариации распределения вольфрама отмечаются внутри отдельных седиментогенных комплексов при значительном обогащении алевритоглинистых фракций по сравнению с грубообломочными. Интерпретация генезиса и источников рудного вещества в вулканогенно-осадочных образованиях эвгеосинклиналией в основном однозначна: вольфрамовая минерализация связывается с подводным вулканизмом основного состава. Формирование металлонесных осадков в терригенных миогеосинклинальных толщах происходит в результате сноса выветрелого обломочного материала, а также коллоидных и истинных растворов, обогащенных вольфрамом с материка, а также экстракции вольфрама из

морской воды. Прогрессирующее накопление вольфрама коррелируется с увеличением степени метаморфизма.

Рассеянные накопления вольфрама в вулканогенно-осадочных и осадочных толщах не дают практически значимых скоплений и месторождений. Однако последующий метаморфизм, мобилизация и перераспределение рудного вещества приводят к образованию метаморфогенных стратиформных рудопоявлений и месторождений. В настоящее время можно выделить три отчетливых генетических типа вольфрамового метаморфогенного оруденения: скарноидный, кварцитовый, тактитовый. А. П. Гуляев и др. [6] подразделил стратиформные проявления на две группы — шеелит-сульфидно-скарноидную и шеелит-сульфидно-кварцитовую. Под скарноидами понимаются гранат-пироксеновые, часто рудоносные образования, формирующиеся в результате метаморфических процессов без участия гранитоидного магматизма. Они имеют сходный со скарнами набор минералов, развиваются по пластам амфиболитов, метадиабазов, графитизированных гнейсов. Шеелитоносные кварциты развиваются при метаморфизме по терригенным толщам. В. М. Моралев, Р. Э. Ткачева [7] рассматривают шеелитоносные тактиты как метаморфические образования, приуроченные к зонам соприкосновения — контактам карбонатных и алюмосиликатных пород докембрийских толщ без участия гранитоидного магматизма. Все эти три разновидности метаморфических образований проявляются в различной геологической обстановке. Хотя в подавляющем большинстве известных проявлений шеелитоносных скарноидов, кварцитов, тактитов отсутствует “чистота опыта”: почти всегда в пределах рудных полей хоть в незначительных количествах встречаются дайки, пегматитовые жилы, прожилки и даже небольшие штоки. В то же время доводы исследователей по каждому конкретному объекту в пользу их метаморфогенного происхождения выглядят вполне убедительно.

Этими тремя типами все многообразие вольфрамоносных метаморфогенных образований не исчерпывается. Например, на Украинском щите Г. М. Яценко и др. [8] установлены шеелитоносные диопсид-плагиклаз-кварцевые породы, развивающиеся по биотитовым, гранат-биотитовым, биотит-кордиеритовым гнейсам и залегающие в виде будинированных прослоев. Известна шеелитовая минерализация среди железистых кварцитов. Однако ни одной сводной работы по вольфрамоносности метаморфических образований с систематикой всех типов оруденения нет.

Магматогенное вольфрамовое оруденение имеет очень широкий диапазон физико-химических условий кристаллизации вольфрамовой минерализации и геологических условий его формирования. *Вольфрамовое оруденение сопровождает практически всю историю развития подвижных областей от геосинклинального этапа до посторогенного, т. е. имеет сквозной характер.* Обычно при выделении вольфраморудных формационных рядов, конкретных формаций акцент делается на специфике вещественного состава оруденения и его ассоциации с гранитным магматизмом. При этом мало внимания уделяется приуроченности разнотипного оруденения к определенным геотектоническим этапам развития подвижных областей, без чего невозможно проследить эволюцию и векторную направленность смены типового состава вольфрамового оруденения во времени, соответственно и в латеральной приуроченности к определенным геологоструктурным зонам. В различные геотектонические этапы изменяется формационный состав оруденения и нарастает его разнообразие.

Для вольфрама характерны геохимические взаимосвязи с элементами других металлов, в связи с чем он часто образует комплексные месторождения. Причем взаимосвязи эти не постоянны и проявляются во вполне определенных геологических условиях. Так, олововольфрамовое оруденение типично для кварцево-грейзеновых раннеорогенных рудных

объектов. В последующем в среднеорогенный этап геохимические взаимосвязи вольфрама и олова ослабевают, однако усиливаются с молибденом. В позднеорогенно-активизационные этапы при формировании континентальных вулканоплутонических комплексов взаимосвязи вольфрама с оловом, молибденом затухают и доминирующими становятся со свинцом, цинком, медью, серебром. В посторогенный этап характерны взаимосвязи вольфрама с сурьмой, ртутью. Следовательно, в различных геологических структурах, формирующихся на разных этапах подвижных областей, вольфрам ведет себя как космополит. Кстати, такие же свойства отмечает Н. А. Шило [9] для золота. В связи с этим совместная минерализация вольфрама и золота в различных количественных взаимоотношениях характерна для многих типовых разновидностей рудных объектов.

Таким образом, в истории развития подвижных областей с эволюцией магматизма сопряжена смена формационного состава оруденения, форм взаимосвязи его с магматизмом, источников рудного вещества. Глубина зарождения магматических очагов волнообразно изменяется от геосинклинального этапа к посторогенному. В геосинклинальный этап вскрывались подкоровые мантийные глубины. При орогенных процессах активная тектономагматическая деятельность перемещалась на более высокие уровни, где в результате анатексиса и палингенеза корового вещества возникали магматические очаги сиалического профиля. В последующем при затухании активных орогенных процессов при стабилизации горно-складчатого сооружения, когда при переходе в стадию молодой платформы усиливаются процессы тафро- и рифтогенеза, вновь происходит вскрытие подкоровых мантийных глубин и поступление мафитового и щелочного магматического материала. При эволюционной смене геосинклинальной магматической деятельности орогенной, когда меняется глубинность магматических очагов и вещественный состав магматических продуктов, так же и при последующей смене орогенеза тафро- и рифтогенезом (посторогенный этап), сопровождающимся сменой корового сиалического гранитного магматизма мантийным базит-гипербазит-щелочным, в переходные геотектонические этапы (инверсионный и позднеорогенный) неизбежно в различной степени смешение мантийного и корового вещества. Именно в такие этапы возникает золотовольфрамовое (шеелитовое) и вольфрамполиметаллическое оруденение. Глубинностью магматических очагов определяется характер магматизма, источники рудного вещества, геохимический профиль оруденения. Все это можно отразить графически (рис. 1) [10].

В 1982 г. автором была предложена классификация эндогенного вольфрамового оруденения [11]. Она базировалась, учитывая сквозной характер вольфрамового оруденения, на теоретической основе однонаправленного эволюционного развития подвижных (геосинклинально-складчатых) областей, сопровождавшегося закономерной сменой разнотипного магматизма. Классификация также учитывала проявление оптимальных геохимических взаимосвязей вольфрама с другими рудными элементами в определенные геотектонические этапы. При этом под “рудной формацией” понималось оруденение сходного вещественного состава, сформировавшееся в связи с той или иной геологической (магматической) формацией в конкретной геолого-структурной обстановке в определенные этапы геотектонического развития.

Однако в классификации роль геосинклинального магматизма ограничивалась лишь привнесением вольфрама при подводном вулканизме основного состава и его рассеянном накоплении в вулканогенно-осадочных толщах. Также и посторогенный этап ограничивался лишь ртутно-сурьмяно-вольфрамовым оруденением. Полученные с течением времени новые данные не затронули принципиальную схему классификации, а лишь коснулись необходи-

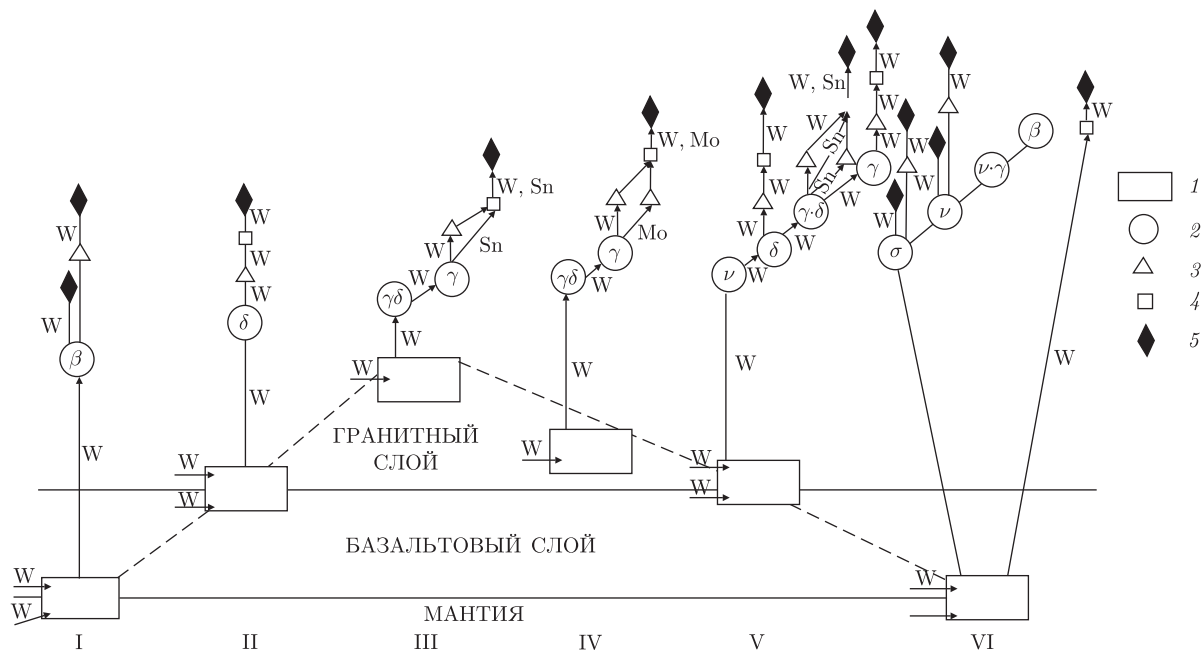


Рис. 1. Принципиальная схема развития магматизма подвижных областей и формирования ассоциирующего с ним вольфрамового оруденения (с учетом возможности его комплексирования с оловом и молибденом):

1 — магматические очаги; 2 — магматические продукты (интрузивные тела); 3 — остаточные расплавы и гидротермы при магматической деятельности; 4 — гидротермальные растворы при постмагматической деятельности; 5 — месторождения. Этапы развития подвижных областей: I — геосинклинальный; II — инверсионный; III — раннеорогенный; IV — среднеорогенный; V — позднеорогенный; VI — посторогенный [10]

мости расширения таксономической ниши геосинклинального оруденения и, в какой-то степени, посторогенного (рис. 2). Однако, в связи с невозможностью придать формационную окраску посторогенному базальтофильному оруденению, некоторые ниши классификации остаются не заполненными.

Ныне же при существенном расширении вольфрамоносных генетических типов оруденения, степень изученности которых далеко не равнозначна, формационная классификация возможна только для гранитофильного оруденения (см. рис. 2); для базальтофильного оруденения пока что следует ограничиться только систематикой различных генетических типов [1], которая требует своего уточнения и более полного обоснования; для метаморфогенного оруденения необходимо выяснение всех разновидностей типов оруденения и последующая их систематика пока что на генетическом уровне.

Таким образом, в связи с расширением номенклатуры вольфрамоносных рудных образований, помимо изучения традиционных типов оруденения, необходима ускоренная разработка теории вольфрамового рудообразования при магматической деятельности основного-ультраосновного состава, а также при метаморфических процессах, учитывая их промышленную значимость. Это наиболее актуально для Украины, где минерально-сырьевая база вольфрама в настоящее время отсутствует. Перспективы выявления богатого оруденения традиционных гранитофильных типов невелики (хотя имеются рудопроявления — Пержанская зона). В то же время есть все основания рассчитывать на созда-

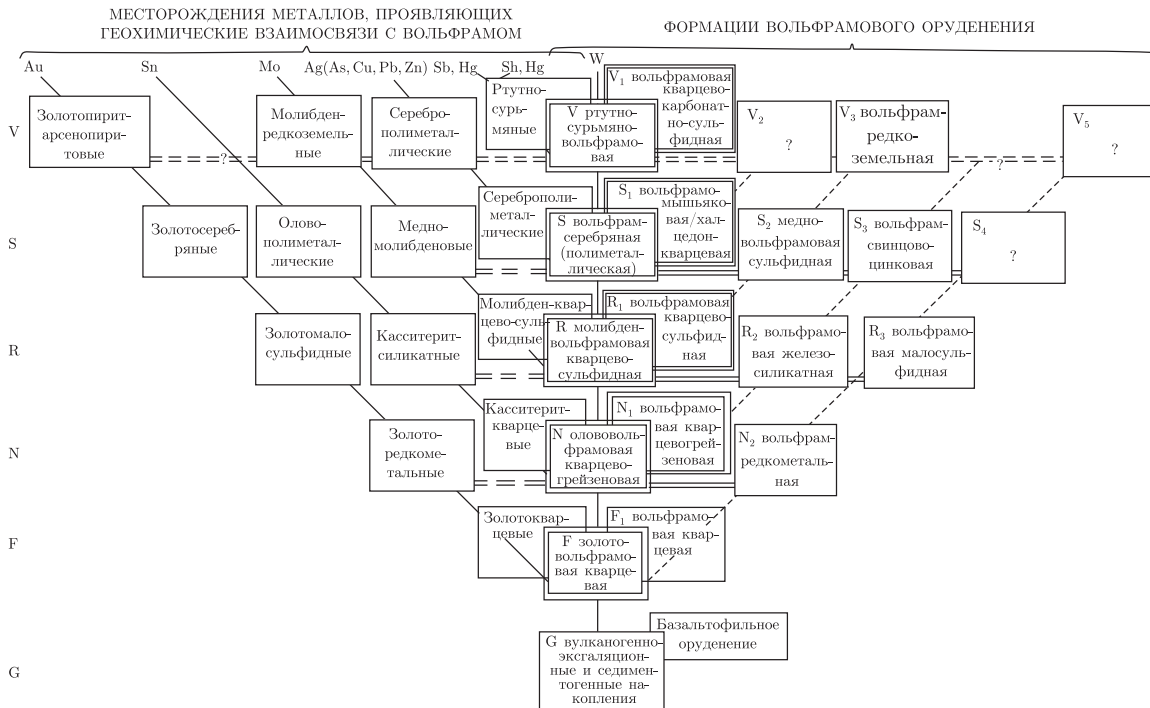


Рис. 2. Диаграмма эволюции месторождений различных металлов в истории развития подвижных областей и соотношения их с вольфрамовым оруденением:

G — геосинклинальный этап; F — инверсионный; N — раннеорогенный; R — среднеорогенный; S — позднеорогенный; V — посторогенный [11]

ние собственной сырьевой базы вольфрама за счет базальтофильного и метаморфогенного оруденения. Наглядным примером может служить Бразилия, которая полностью обеспечивает свои потребности за счет вольфрамоносных тактитов на кристаллическом щите [7].

1. Воеводин В. Н. Вольфрамовое оруденение в областях базит-гипербазитового магматизма // Геология рудн. месторождений. – 2004. – 46, № 5. – С. 456–470.
2. Гарьковец В. Т. О закономерностях сингенетично-эпигенетического (литогенетического) рудообразования // Докл. АН СССР. – 1982. – 266, № 4. – С. 940–943.
3. Ковалев А. А., Ушаков С. А. Тектоника плит и полезные ископаемые Катании (Юго-Восточный Китай). – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2002. – 208 с.
4. Бакулин Ю. И. О причинах приуроченности эндогенного оруденения к стратиграфическим уровням // Тихоокеан. геология. – 2002. – 21, № 6. – С. 116–119.
5. Гончаров В. И., Ворцетнев В. В., Альшевский А. В. О магматогенной природе золотого оруденения в складчатых структурах Северо-Востока СССР // Там же. – 1985. – № 5. – С. 53–61.
6. Гуляев А. П., Адамян Н. Х., Фатхутдинов Д. Х. О стратиморфном шеелитовом оруденении в Северном Казахстане // Геология рудн. месторождений. – 1982. – № 6. – С. 52–61.
7. Моралев В. М., Ткачева Р. Э. Докембрийские шеелитоносные тактиты и некоторые новые аспекты металлогении вольфрама // Геология и полезн. ископаемые докембрия. – Москва: Недра, 1975. – Вып. 29. – С. 143–148.
8. Яценко Г. М., Росихина А. И., Янчук Э. А. О шеелите из диопсид-плаггиоклаз-кварцевых пород Украинского щита // Минерал. сб. Львов. ун-та. – 1975. – Вып. 4. – С. 74–75.
9. Шило Н. А. Золоторудные месторождения метаморфогенной, плутоногенной и вулканогенной формаций / Геолого-геохимические особенности месторождений полезных ископаемых на Северо-Востоке СССР. – Магадан: Б. и., 1976. – С. 3–41.

10. Воеводин В. Н. Роль магматизма в формировании вольфрамового оруденения Тихоокеанских подвижных областей // Тихоокеан. геология. – 1982. – № 2. – С. 13–22.
11. Воеводин В. Н. Принципы рудноформационного анализа и генетическая классификация эндогенного вольфрамового оруденения // Сов. геология. – 1982. – № 4. – С. 34–48.

Харьковский национальный университет  
им. В. Н. Каразина

Поступило в редакцию 10.12.2007

УДК 551.465.15

© 2008

Член-корреспондент НАН Украины В. А. Иванов, А. С. Самодуров,  
А. М. Чухарев, А. В. Носова

## Интенсификация вертикального турбулентного обмена в районах сопряжения шельфа и континентального склона в Черном море

*The dependence of the vertical turbulent exchange intensity on the local stratification in stratified layers of the Black Sea near the interface between the shelf and the continental slope is estimated by the data of field measurements. The field experiments were performed within the framework of the international projects GEF/BSERP (May, 2004) and “Black Sea – 2004” (July, 2004) and also the national projects (May, 2007). Information is got with the use of the probing system “Sigma-1” [1]. As a data processing tool, the method [2, 3] of estimation of the vertical turbulent diffusion coefficient depending on external conditions is used. The mean values of the coefficient of turbulent exchange in all explored regions proved to be substantially greater (approximately by one order of magnitude) as compared to that under conditions of the open sea for the identical local stratification. This can be related to a peculiarity of the bottom topography influencing the dynamics of quasiinertial internal waves which serve here as a basic reason of the small-scale mixing and vertical diffusion.*

Вертикальный турбулентный обмен в деятельном слое океанов и морей играет важную роль в формировании океанологических полей в водной среде. Постановка и решение экологических проблем и задач прогноза изменения климата океанов и морей за счет естественных и антропогенных воздействий невозможны без детального знания механизмов обмена и расчета потоков тепла и растворенных веществ в естественных бассейнах.

Опыт последних десятилетий в создании и верификации моделей, описывающих процессы обмена, показывает, что для получения полного представления о путях распространения примесей, интенсивности потоков тепла и растворенных химических и биологических веществ [1] необходимы детальные знания и соответствующий учет основных физических механизмов, участвующих в этих процессах.

Вместе с тем построение адекватных теоретических и полуэмпирических моделей вертикального турбулентного обмена чаще всего невозможно без детального исследования особенностей тонкой структуры и микроструктуры гидрофизических полей в различных физико-географических условиях, что, в свою очередь, позволяет выявить физические механизмы, определяющие основной вклад в обмен.