

На правах рукописи

**Арбузов Сергей Иванович**

**Геохимия редких элементов в углях  
Центральной Сибири**

25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Томск - 2005

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный консультант: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор Рихванов Леонид Петрович

Официальные оппоненты:

Алексеев Валерий Порфирьевич - доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, г. Екатеринбург

Гавшин Всеволод Михайлович - доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник, г. Новосибирск

Юдович Яков Эльевич - доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник, г. Сыктывкар

Ведущая организация – Институт геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2005г.  
в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.03 Томского  
политехнического университета по адресу: Россия, 634004, г.Томск, пр. Ленина  
30, корпус 1, ауд. 210

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТПУ

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2005г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета, к.г.-м.н., доцент

О.Г. Савичев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований.** Центральная Сибирь обладает уникальными угольными ресурсами. По разным оценкам здесь сосредоточено от 3,5 до 70 трлн.т. угля (Юзвицкий и др., 1999, 2000). Прогнозируемый в ближайшем будущем рост угледобычи, уже сейчас превышающий 70 % от общероссийской, обуславливает необходимость создания высокоэффективных технологий утилизации отходов добычи и использования угля с целью минимизации воздействия этих процессов на окружающую среду.

Основные пути уменьшения влияния процессов добычи и использования угля на окружающую среду, направления утилизации отходов его переработки в общих чертах определены еще в прошлом веке (Юровский, 1968; Шпирт, 1986 и др.). Одним из рациональных путей решения этой проблемы является комплексное освоение месторождений, включающее извлечение из углей и углеотходов большого спектра элементов-примесей, главным образом ценных редких и благородных металлов. В настоящее время редкометалльный потенциал углей почти не востребован. Из углей и углеотходов в промышленных масштабах получают лишь Ge и Au, разработаны технологии извлечения Ga, Sc, U, Y, редкоземельных и некоторых других металлов (Комисарова и др., 1969; Шпирт, 1977; Шацкий и др., 1979; Иванова, 1984; Металлогения..., 1988; Жаров, 1994; Кац и др., 1998; Леонов и др., 1998 и др). В перспективе рассматривается возможность полной комплексной переработки углей, обогащенных редкими элементами. По расчетам специалистов, угли и отходы их переработки могут обеспечить значительную долю потребности мировой экономики в большинстве редких и цветных металлов (Finkelman, Brown, 1988 и др.). Однако практическая реализация такого подхода ограничена не только низкой экономической эффективностью предлагаемых технологических решений, но и недостаточной изученностью микроэлементного состава угольных месторождений.

В настоящее время для большинства угольных бассейнов и месторождений мира в полном объеме не реализован даже первый этап решения проблемы комплексного освоения – оценка их металлоносности. Для большинства угольных месторождений нет даже достоверных оценок среднего содержания редких элементов в углях. Редкометалльный состав углей в связи со сложностью анализа многих элементов-примесей в органическом веществе оценен лишь в небольшом числе бассейнов, главным образом в странах с развитой экономикой (США, Европейский Союз, Австралия). Вместе с тем доказано, что отдельные угольные пласты или даже месторождения в ряде случаев можно рассматривать в качестве потенциального комплексного источника цветных, редких и благородных металлов (Юровский, 1968; Boyle, 1979; Юдович и др, 1985; Юдович, 1989; Жаров, 1994; Середин, 1991, 1994, 2003 и др.). Для выявления таких месторождений необходима разработка критериев их поисков. С этой целью должны изучаться условия и механизмы концентрирования редких элементов в углях. В настоящее время пока нет отчетливых представлений ни о роли различных геологических процессов в накоплении редких металлов в угольных пластах, ни о формах нахождения и механизмах концентрирования элементов в углях. Имеющиеся довольно многочисленные данные разных исследователей, относящиеся к конкретным объектам, часто содержат противоречивую информацию.

В последние два десятилетия массовые геохимические исследования проведены в

большинстве угольных бассейнов и месторождений Центральной Сибири. Накоплен обширный фактический материал, позволяющий впервые на основе современной аналитической базы выполнить комплексную оценку металлоносности углей. Недостаточная геохимическая изученность углей и обусловила постановку масштабных геохимических исследований. Решение этой проблемы позволит использовать колоссальную ресурсную базу углей Центральной Сибири для обеспечения промышленности не только энергетическим и технологическим сырьем, но и редкими и цветными металлами.

**Цель исследований** – изучить закономерности накопления и распределения редких элементов в угленосных отложениях Центральной Сибири.

**Задачи исследований:**

1. Оценить средние содержания редких элементов в угольных бассейнах и месторождениях и определить их кларки для углей Центральной Сибири.
2. Изучить закономерности распределения редких элементов-примесей в угольных пластах, угленосных толщах, угольных месторождениях и бассейнах.
3. Определить степень влияния геолого-тектонических, магматических, минерагенических, гидрогеохимических, палеогеографических, климатических, фациальных, эпигенетических и др. факторов на формирование геохимических особенностей углей региона.
4. Исследовать формы нахождения редких элементов в торфах и углях разной степени углефикации.
5. Изучить условия накопления высоких концентраций редких элементов в углях и угле вмещающих породах угленосной толщи.
6. Определить геохимическую специализацию угольных бассейнов и месторождений Центральной Сибири и на этой основе раскрыть их редкометалльный потенциал.
7. Дать оценку перспектив комплексного освоения угольных месторождений и бассейнов Центральной Сибири.

**Фактический материал и личный вклад автора в решение проблемы.** В основу диссертационной работы положены материалы, полученные автором в процессе выполнения плановых госбюджетных и хоздоговорных тем кафедрой геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. Исследования выполнялись по госбюджетной теме 1.11 “Исследование закономерностей распределения редких элементов в рудно-магматических системах и угольных месторождениях” (1996 -1999 гг.) и госбюджетной теме 2 (Код ГАСНТИ 87.03.05) “Оценка перспектив комплексного освоения месторождений углей и золо-шлаковых отходов” (1998 г). Основной фактический материал получен при выполнении работ по контрактам с администрациями Кемеровской, Томской областей, Красноярского края, Республики Хакасия и Республики Алтай, а также при проведении инициативных исследований в Томской, Новосибирской и Иркутской областях, в Республике Тыва и Эвенкийском национальном округе.

Диссертант лично участвовал в обосновании, организации и проведении всех работ по комплексной геохимической оценке угольных месторождений Центральной Сибири. Автором вместе с коллегами сформулированы научные задачи, проведено опробование, экспериментальные исследования, разработана методика комплексной геохимической оценки угольных месторождений региона и методика изучения

динамики изменения форм нахождения редких элементов-примесей в процессе углефикации. Автором лично получены новые научные результаты по геохимии и минерагении угленосных отложений Центральной Сибири.

С разной степенью детальности изучены 8 угольных бассейнов Центральной Сибири: Кузнецкий, Минусинский, Тунгусский, Горловский, Канско-Ачинский, Улугхемский, Иркутский, Западно-Сибирский, - и 6 самостоятельных месторождений: Барзасское, Убруское, Пыжинское, Курайское, Талду-Дюргунское, Балхаш (рис.1).

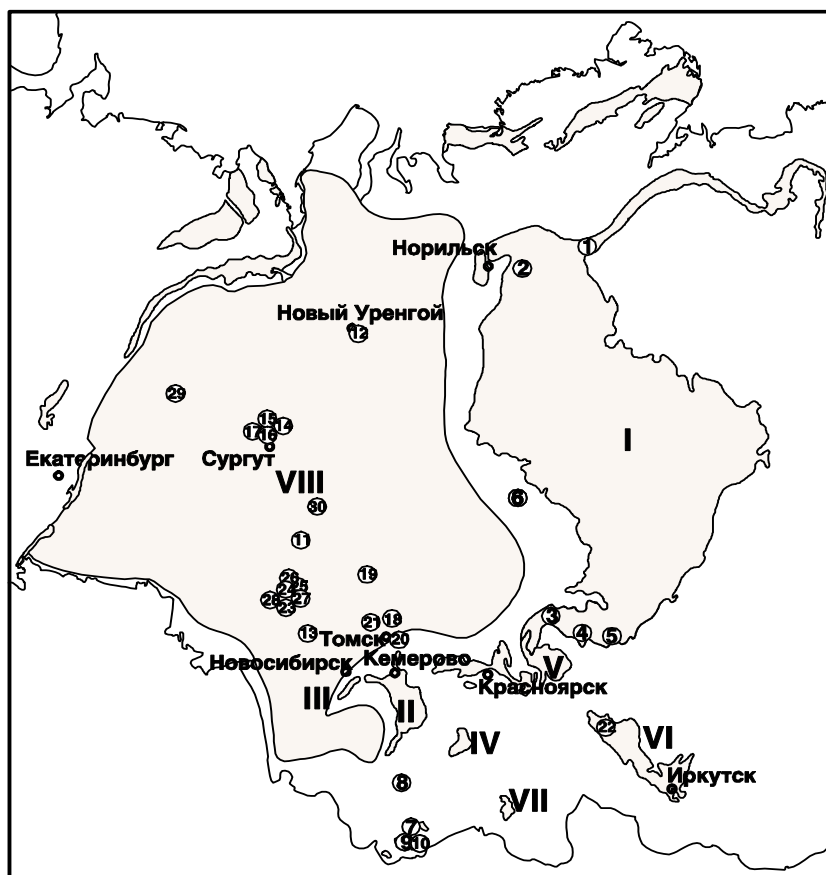


Рис.1. Схема расположения изученных угольных бассейнов и месторождений в Центральной Сибири

Объекты опробования: Бассейны: I-Тунгусский; II-Кузнецкий; III-Горловский; IV-Минусинский; V-Канско-Ачинский; VI-Иркутский; VII-Улугхемский; VIII-Западно-Сибирский.

Месторождения: 1-Каякское; 2-Кайерканское; 3-Кокуйское; 4-Гавриловское; 5-Кодинское; 6-Подкаменно-Тунгусское; 7-Курайское; 8-Пыжинское; 9-Талду-Дюргунское; 10-Балхаш; 11-Мыльджинское; 12-Уренгойское; 13-Верхтарское; 14-Кавринское; 15-В-Тромъеганское; 16-Конитлорское; 17-Ай-Пимское; 18-Туганское; 19-Колпашевское; 20-Лагерносадское; 21-Таловское; 22 - Тулунское; 23-Табаганское; 24-Широтное; 25-Герасимовское; 26-Лугинецкое; 27-Северо-Калиновое; 28-Арчинское; 29-Яхлинское; 30-Трассовое

В основу работы положены результаты анализов более 3600 бороздовых и керновых проб угля и углевмещающих пород, более 1200 проб торфа, целенаправленно отобранных и подготовленных автором. Количественная оценка содержания редких элементов получена инструментальным нейтронно-активационным методом, методом запаздывающих нейтронов, рентгено- флюоресцентным, атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой, атомно-эмиссионным масс-спектрометрическим

методом, атомно-адсорбционным с электротермической атомизацией, сорбционно-атомно-абсорбционным методом, эмиссионным спектральным и другими методами анализа в ядерно-геохимической лаборатории Томского политехнического университета, Региональном аналитическом центре “Механобр-Аналит” (г. Санкт-Петербург), центральной аналитической лаборатории Института Геохимии им. Вернадского (г. Москва), центральной аналитической лаборатории ФГУП “Березовгеология”. Электронно-микроскопические исследования форм нахождения редких элементов в углях и золах углей выполнены С.М. Жмодиком и Л.В. Агафоновым в ОИГГиМ СО РАН (г. Новосибирск) на микроскопе SEM 1430VP EDX Oxford и И.О. Галускиной в Силезском университете (Польша). Всего исследовано более 6 тысяч проб углей, углевмещающих пород, различных фракций и препаратов (табл. 1).

Таблица 1

Изученность угольных бассейнов и месторождений Центральной Сибири

№ п/п	Объект исследования	Количество проб
1	Уголь и вмещающие породы	3609
2	Торф	1289
3	Зола угля	729
4	Зола торфа	140
5	Фракции угля разной плотности	220
6	Фракции группового состава угля и торфа	224
7	Фракции кислотной деминерализации угля	96
8	Фракции гидрогенизации	12
9	Пробы для электронной микроскопии	16
10	Угольные шлифы, аншлифы и брикеты	100
11	Препараты для f-радиографии	60
12	<b>Всего</b>	<b>6495</b>

Кроме того, выполнялось исследование качественных характеристик углей. При специализированных исследованиях оценивалась стадия метаморфизма, минеральный и мацеральный состав, а для торфов - ботанический состав. Для оценки форм нахождения кроме прямых электронно-микроскопических анализов выполнялось разделение проб угля на фракции разного удельного веса и их изучение, изучались продукты кислотной деминерализации углей и групповой состав углей и торфов. Для оценки форм нахождения и закономерностей распределения U в углях и вмещающих породах выполнен большой объем радиографических исследований. Изучались технологические свойства углей и отходов их переработки с целью получения концентратов редких металлов.

#### **Научная новизна работы:**

1. На основе большого объема данных количественных методов анализа представительных бороздовых и керновых проб выполнена оценка кларков редких элементов-примесей в углях Центральной Сибири.

2. Впервые выполнена оценка редкометалльной геохимической специализации угольных бассейнов и месторождений Центральной Сибири, сформировавшихся в различные геологические эпохи в разных геолого-структурных обстановках. Установлен сквозной характер геохимической специализации разновозрастных угленосных отложений. Впервые изучено изменение геохимической специализации

углей во времени.

3. Выявлены факторы, определяющие геохимическую специализацию и редкометалльный потенциал углей Центральной Сибири. Впервые показано доминирующее влияние вулканизма субсинхронного угленакоплению на формирование геохимического фона палеозойских углей Сибири. Обоснован глобальный характер вулканизма в период позднепалеозойского угленакопления. Установлено изменение во времени влияния разных факторов на накопление редких элементов в углях

4. Изучены закономерности распределения редких элементов-примесей в разрезе угленосных отложений Центральной Сибири. Исследован механизм образования приконтактовых аномалий в угольных пластах. Обоснована двойственная седиментационно-диагенетическая инфильтрационно-диффузионная природа образования приконтактовых зон обогащения редкими элементами-примесями в угольных пластах.

5. Исследованы формы нахождения редких элементов в торфах, бурых и каменных углях. Доказано изменение форм нахождения редких элементов в процессе углеобразования. На примере Западно-Сибирского бассейна изучен биогенно-сорбционный механизм сингенетичного накопления золота и серебра в торфах и углях.

#### **Практическая ценность работы:**

Практическая значимость работы заключается в разработке новых критериев прогнозирования и поисков редкометалльно-угольных месторождений в Центральной Сибири с целью их комплексного освоения. Исследование фоновых и аномальных содержаний элементов-примесей и оценка геохимической специализации угольных бассейнов и месторождений является основой для прогнозно-поисковых работ как в пределах угленосных отложений, так и в структурах обрамления.

Впервые на основе представительных данных количественного анализа и опубликованных материалов дана оценка редкометалльного потенциала углей отдельных месторождений и бассейнов Центральной Сибири. Показано, что угли региона перспективны на выявление промышленно значимых месторождений германия, скандия, золота, ниобия, тантала, циркония, иттрия и лантаноидов.

Результаты изучения закономерностей латеральной и вертикальной изменчивости распределения элементов-примесей в угленосных отложениях позволяют прогнозировать качество углепродукции на стадии геолого-экономической оценки месторождений и выявлять угольные пласты и месторождения, перспективные для комплексного освоения. На основании этих данных выполнена оценка качества товарной продукции, в том числе ее радиоэкологической опасности, ряда угледобывающих предприятий Кузнецкого, Минусинского и Канско-Ачинского угольных бассейнов. Эти результаты переданы на предприятия, в управления природных ресурсов по Красноярскому краю, Кемеровской области, Республике Хакасия и Республике Алтай.

Исследование форм нахождения редких элементов в углях позволяет обеспечить выбор наиболее эффективной технологии обогащения и извлечения ценных элементов-примесей из углей.

Результаты изучения геохимических особенностей продуктов вулканической деятельности, сохранившихся в угольных пластах, дают новый инструмент для идентификации тонштейнов, позволяющий на качественно новом уровне проводить

стратиграфическую корреляцию угольных пластов.

Определены приоритеты в изучении комплексных редкометалльно-угольных месторождений, выделены месторождения или отдельные угольные пласты для целей их комплексного освоения.

#### **Основные защищаемые положения**

1. Установлена геохимическая специализация углей Центральной Сибири на Be, Ge, Se, Au, Sc, U, Co, As, Sb, Mo, Nb, Y, Zr и лантаноиды. В угольных месторождениях и бассейнах Центральной Сибири установлены аномальные концентрации Ge, Sc, Au, PGE, Be, Se, U, Nb, Ta, Y, Zr и лантаноидов, позволяющие рассматривать их как потенциальное минеральное сырье для получения благородных и редких металлов. Высокая контрастность и масштабы аномалий позволяет прогнозировать высокие перспективы промышленного извлечения редких элементов из углей и углеотходов в Кузбассе, Минусинском, Канско-Ачинском, Тунгусском, Западно-Сибирском и Иркутском бассейнах.

2. Выявлена латеральная и вертикальная неоднородность распределения редких элементов в углях Центральной Сибири, обусловленная спецификой формирования угольных бассейнов и месторождений. Причины, обусловившие неравномерное распределение элементов, разнообразны, но в основном они определяются особенностями минерации и геохимии структур обрамления бассейнов, условиями угленакопления и механизмами поступления элементов в угольный пласт. В угольных пластах на этапе седиментогенеза и раннего диагенеза формируются зоны контактового обогащения редкими элементами, сохраняющиеся на всех стадиях углеобразовательного процесса.

3. Установлено, что в процессе углефикации происходит изменение форм нахождения редких элементов. На ранних стадиях углеобразования при седиментогенезе и диагенезе в торфах, бурых углях и лигнитах основная их масса накапливается в составе органического вещества, главным образом в гуминовых веществах в виде простых и комплексных гуматов и в ионообменной форме. В зрелых каменных углях преобладает минеральная форма нахождения основной массы редких металлов.

4. Выявлено, что в процессе глобальной эволюции угленакопления происходила закономерная смена отдельных факторов, обеспечивавших концентрирование редких элементов в углях Центральной Сибири. Редкометалльная геохимическая специализации позднепалеозойских углей определялась влиянием вулканизма синхронного торфонакоплению, а специализация углей мезозойского и кайнозойского возраста – геохимической и металлогенической специализацией областей питания бассейнов угленакопления и ландшафтно-климатическими условиями. Наложённые гидротермальные, контактово-метасоматические процессы и процессы гипергенного окисления углей обеспечивали перераспределение, вынос и накопление редких элементов, что сказалось на изменении геохимического фона и на появлении локальных аномалий в углях отдельных месторождений.

**Достоверность защищаемых положений.** Достоверность защищаемых положений доказывается большим массивом фактического материала, включающего данные по всем основным угольным бассейнам и месторождениям Центральной Сибири. Она обоснована использованием большого массива высококачественных аналитических и экспериментальных данных, полученных современными методами исследований в



ведущих аналитических центрах России.

Качество полученных данных непрерывно контролировалось параллельным определением элементов несколькими аналитическими методами, данными внешнего и внутреннего контроля. Кроме того, для контроля все угольные пробы озолялись и параллельно с изучением содержания элемента в основной пробе, он определялся в золе угля.

Электронно-микроскопические исследования проведены в двух независимых лабораториях: в ОИГТиМ СО РАН (г. Новосибирск) и в Силезском университете (Польша).

Результаты анализа группового состава торфа и бурого угля и данные деминерализации подтверждены дублированием отдельных опытов. В качестве критерия качества аналитических данных использовались результаты расчета баланса металлов по групповому составу.

**Апробация работы.** Основные результаты работы по теме диссертации были доложены на Международных конференциях: “ Энергетика и окружающая среда” (Хабаровск, 1992), “Благородные и редкие металлы” (Донецк, 1994), “Редкоземельные металлы: переработка сырья, производство соединений и материалов на их основе” (Красноярск, 1995), “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека” (Томск, 1996, 2004), “Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке (Москва, 1998), “Экологические проблемы угледобывающей отрасли в регионе при переходе к устойчивому развитию” (Кемерово, 1999), “Химия на рубеже тысячелетий” (Москва, 2000), “Горно-геологическое образование в Сибири” (Томск, 2001), “Новые идеи в науках о Земле” (Москва, 2000), “Металлургия цветных и редких металлов” (Красноярск, 2003), “Минерально – сырьевые ресурсы тантала, ниобия, бериллия, циркония и фтора: геология, экономика, технология” (Усть-Каменогорск, 2003), “Золото Сибири и Дальнего Востока” (Улан-Удэ, 2004), на IV объединенном международном симпозиуме по проблемам прикладной геохимии (Иркутск, 1994), III Всероссийской конференции “Гуминовые вещества в биосфере”(Санкт-Петербург, 2005), а также на региональных научных конференциях: “Проблемы геологии Сибири” (Томск, 1994), “Региональные проблемы экологии” (Новокузнецк, 1994), “Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды” (Томск, 1995), “Новые данные о геологии и полезных ископаемых западной части Алтае - Саянской области” (Новокузнецк, 1995), “Актуальные вопросы геологии и географии Сибири” (Томск, 1998), “Проблемы металлогении юга Западной Сибири” (Томск, 1999), “Итоги и перспективы геологического изучения Горного Алтая” (Горно - Алтайск, 2000), “Формационный анализ в геологических исследованиях” (Томск, 2002), “Проблемы геологии и географии Сибири” (Томск, 2003), “Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края” (Красноярск, 2003).

**Публикации.** Основное содержание и научные положения диссертации опубликованы в 52 работах, в том числе в 2 монографиях и в 50 статьях и тезисах докладов. Из них не менее 15 научных статей опубликованы в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК.

#### **Благодарности.**

Автор благодарен сотрудникам кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета за поддержку и помощь на всех этапах выполнения

диссертационной работы.

Диссертант искренне признателен старшим коллегам д.г.-м.н., профессорам Л.П. Рихванову, А.Ф. Коробейникову, И.В. Кучеренко, к.г.-м.н. В.А. Домаренко за своевременную помощь и поддержку этих исследований.

Особую благодарность хочется выразить соратникам и соисполнителям работ к.г.-м.н. В.В. Ершову, А.А. Поцелуеву и А.В. Волостнову, вместе с которыми пройден этот путь.

Выполнение работы было бы невозможно без поддержки специалистов, выполнявших аналитические работы Л.В. Агафонова, Г.Н. Аношина, В.А. Варлачева, С.Н. Зиминной, В.М. Левицкого, В.А. Рыжкова, А.Ф. Судыко, Н.А. Чарикова и др.

Диссертант искренне благодарит за участие в совместных исследованиях российских коллег В.С. Архипова, В.К. Бернатониса, А.В. Ежову, С.М. Жмодика, А.Я. Каца, С.Г. Маслова, А.И. Мухамедянова, А.Ю. Никифорова, А.П. Павлова, А.К. Полюенко, А.И. Попова, С.Н. Рассказова, Н.П. Ромашихину, И.В.Русских, В.М. Соболенко, Т.Ю. Усову, И.А. Чижики, В.И. Шарыпова, А.Ю. Шатилова, В.В. Шепелева и доцента Силезского университета (Польша) И.О. Галускину.

На разных этапах выполнения работы автор имел возможность получить консультации и воспользоваться советами, а в ряде случаев и непосредственной помощью членов-корреспондентов РАН В.Ф. Балакирева, В.И. Величина, В.А. Каширцева, Б.Н. Кузнецова, Г.Н. Пашкова, д.г.-м.н. А.Г. Бакирова, И.Б. Волковой, А.В. Вана, И.В. Гончарова, Л.Я. Кизильштейна, В.В. Коваленко, В.А. Макарова, А.Г. Миронова, Г.Б. Наумова, А.М. Сазонова, А.З. Юзвического, д.х.н М.Я. Шпирта, д.т.н. И.А. Коробецкого, В.П. Потапова, В.М. Страхова, к.г.-м.н. Л.А. Адмакина, Б.Д. Васильева, А.В. Владимировой, Е.М. Дутовой, А.А. Запорожченко, Ю.Г. Копыловой, Б.Ф. Нифантова, Ю.Н. Попова, А.Я. Пшеничкина, В.Н. Ростовцева, В.Н. Санина, В.В. Середина, Н.М. Черновьянца, Е.Г. Язикова, И.Ю. Яковлева и других ученых и специалистов. При решении технологических вопросов комплексного освоения угольных месторождений работы велись в тесном сотрудничестве с С.А. Бабенко, Ю.Л. Гуревичем, Л.Н. Комисаровой, Г.Н. Котельниковым, В.А. Лотовым, А.И. Соловьевым. Дружескую поддержку и помощь в поиске зарубежных публикаций оказали зарубежные ученые профессор Софийского университета G.M. Eskenazy и сотрудник Геологической службы США доктор R.V. Finkelman. Всестороннюю помощь при выполнении библиографических исследований оказали сотрудники научно-технической библиотеки им. В.А.Обручева ТПУ Н.И. Кубракова, Т.А. Романова, О.К. Попова. Всем им автор выражает искреннюю благодарность.

Автор выражает признательность сотрудникам комитета природных ресурсов по Кемеровской области В.П.Баловневу, Е.Н. Трибунскому, С.М. Борисову, управления природных ресурсов и охраны окружающей среды по Республике Хакасия В.В. Кяргину, А.А. Булатову, Н.Е. Дубовику за поддержку и помощь в издании монографий по геохимии и металлоносности углей Кузнецкого и Минусинского бассейнов, а также сотрудникам управления природных ресурсов и охраны окружающей среды по Красноярскому краю А.Г. Еханину, В.С. Миронову и администрации края И.Н. Привалихину, А.Г. Тимошенко, В.В. Усталову за поддержку исследований геохимии углей Канско-Ачинского и Тунгусского бассейнов.

Автор признателен А.В. Ежовой, В.В. Гераскевичу, А.И. Афанасьеву, И.В. Байкову, К.Ю. Кудрину, Р.И. Мухамедянову и др., предоставившим для исследования пробы

из труднодоступных для опробования районов Тунгусского и Западно-Сибирского бассейнов, а также Ю.К. Белову за коллекцию проб углей из Иркутского бассейна.

Диссертант благодарит студентов и аспирантов специальности “Геоэкология” Томского политехнического университета А.М. Беляеву, В.Ю. Берчука, В.С. Бундюка, А.А. Кумарькова, З.И. Павлова, О.С. Фисенко за участие в совместных исследованиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения. Она содержит **499 стр.** текста с **130** таблицами и **107** иллюстрациями. В списке литературы **552** наименования.

*Глава 1* посвящена терминологии, понятию редких элементов и их типизации.

*Глава 2* характеризует изученность геохимии и минерагении угольных бассейнов Центральной Сибири. Приведены сведения об истории изучения редкометалльной геохимии и минерагении угольных бассейнов и месторождений.

*Глава 3* содержит информацию о методах исследования редкометалльной геохимии угольных месторождений и бассейнов. Показана методика опробования угольных пластов и месторождений. Проведен детальный анализ возможности использования современных аналитических методов при изучении углей, дано обоснование выбора рациональных методов для решения поставленных задач.

*Глава 4* характеризует основные черты геологического строения угольных бассейнов и месторождений Центральной Сибири. Помимо общей геологической характеристики здесь приведены сведения о металлогенической и геохимической специализации структур обрамления, данные об областях питания районов угленакопления. Выполнено возрастное сопоставление угленосных отложений различных регионов Центральной Сибири, выделены основные эпохи угленакопления, проявленные на исследуемой территории.

*Глава 5* посвящена изучению уровней накопления и закономерностей распределения редких элементов в угленосных отложениях. Исследовано изменение содержания редких элементов-примесей в углях в ходе геологического развития территории. Показана связь металлоносности углей с общей металлогенией региона. Оценена геохимическая специализация угольных бассейнов и месторождений. Изучено распределение элементов в разрезе угленосных отложений, в разрезе свит и отдельных угольных пластов. Показан механизм формирования приконтактовых зон обогащения редкими элементами в угольных пластах.

*В главе 6* рассматриваются формы нахождения редких элементов в торфах, бурых и каменных углях. Обоснован рациональный комплекс методов изучения форм нахождения редких элементов в углях. Приведены результаты изучения группового состава торфа и бурого угля, результаты химической деминерализации угля, анализа плотностных фракций и данные электронно-микроскопических исследований. Показана эволюция форм нахождения редких элементов в углях в процессе углефикации.

*Глава 7* посвящена анализу факторов, определяющих накопление редких элементов в угольных пластах и формирование редкометалльно-угольных месторождений.

*В главе 8* обоснованы перспективы комплексного освоения угольных месторождений Центральной Сибири. Показано, что угли Сибири перспективны для получения из них Au, Sc, Ge, U и комплекса литофильных редких металлов.

*В заключении* в качестве основных выводов приведены основные защищаемые положения с дополнительной аргументирующей информацией.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**ПОЛОЖЕНИЕ 1.** Установлена геохимическая специализация углей Центральной Сибири на Be, Ge, Se, Au, Sc, U, Co, As, Sb, Mo, Nb, Y, Zr и лантаноиды. В угольных месторождениях и бассейнах Центральной Сибири установлены аномальные концентрации Ge, Sc, Au, PGE, Be, Se, U, Nb, Ta, Y, Zr и лантаноидов, позволяющие рассматривать их как потенциальное минеральное сырье для получения благородных и редких металлов. Высокая контрастность и масштабы аномалий позволяет прогнозировать высокие перспективы промышленного извлечения редких элементов из углей и углеотходов в Кузбассе, Минусинском, Канско-Ачинском, Тунгусском, Западно-Сибирском и Иркутском бассейнах. (Обоснование положения дано в 5 и 8 главах).

Ископаемые угли способны накапливать значительные количества элементов-примесей, нередко достигающих промышленно значимых концентраций. В углях России известны промышленные концентрации Ge, U, Au, PGE, Nb, REE и других элементов (Юдович и др., 1985, 1989; Кац и др., 1998; Середин, 1994, 2002; Леонов и др., 1998; Арбузов и др., 2000, 2003; Бакулин и др., 2003 и др.). Выявление угольных бассейнов, месторождений и отдельных пластов с промышленно значимыми и экологически опасными содержаниями элементов-примесей – одна из главных задач угольной геохимии и минерации. По сути - это поисковая задача.

В современных прогнозно-металлогенических и поисковых геохимических исследованиях для оценки потенциальной рудоносности геологических блоков, структур и горных пород используется понятие геохимическая специализация. На основе геохимической специализации оценивается потенциальная возможность выявления на исследуемой территории месторождений тех или иных рудных элементов. Принято выделять геохимическую специализацию 1 и 2 рода (Принципы и методика., 1979). Специализация первого рода оценивается по коэффициенту концентрации элемента в исследуемом геологическом блоке (горной породе) по отношению к кларку в земной коре. Ее цель – выявление геологических образований с повышенными уровнями накопления ценных элементов. Для оценки специализации второго рода используются параметры, характеризующие геохимическую неоднородность, такие как контрастность коэффициента накопления, высокие коэффициенты вариации рудных элементов и др., т.е. те характеристики, которые свидетельствуют о способности металлов вовлекаться в последующее перераспределение и концентрирование.

В том или ином виде попытки оценить геохимическую специализацию угольных бассейнов Центральной Сибири предпринимались неоднократно, но из-за недостаточного количества данных, либо из-за низкого качества аналитических работ в целом полученные результаты не удовлетворяют современным требованиям (Ольховик, 1973; Башаркевич и др., 1984; Металлогения и геохимия, 1988; Смыслов и др., 1996 и др.). Наиболее полные сведения, включающие последние опубликованные данные, собраны, обобщены и изданы авторским коллективом под редакцией А.А. Смыслова (Смыслов и др., 1996). Уже из ранних работ следовала геохимическая специализация углей Минусинского бассейна на Ge и Sc (Горький, 1964, 1972; Юровский, 1968), Кузнецкого бассейна – на Au, Ge, Zr, Ni (Шахов, Эфенди, 1946; Башаркевич и др., 1984; Металлогения и геохимия, 1988; Ценные и токсичные...,

1996 и др.), Канско-Ачинского – на U (Гаврилин, Озерский, 1996), Иркутского – на Ga, Sn, В (Башаркевич и др., 1984; Крюкова и др., 1988), Тунгусского – на Be и элементы – халькофилы (Беляев и др., 1983).

Полученные на базе современных аналитических методов новые данные о содержании элементов-примесей в углях позволяют не только дополнить и уточнить представления о геохимической специализации отдельных угольных бассейнов и добавить новые сведения о ранее не изучавшихся бассейнах и месторождениях, но и изменить общее представление о геохимической специализации углей региона.

Использование методики оценки среднего как средневзвешенного (Ткачев, Юдович, 1975) позволило нам получить надежные оценки среднего содержания (кларков) элементов-примесей в углях Центральной Сибири.

Угли Центральной Сибири отчетливо обогащены по сравнению с глобальным угольным кларком (Юдович и др., 1985) и данными по другим регионам мира литофильными элементами, характерными для пород щелочного ряда (Zr, Hf, Nb, Y, HREE, Ba, Sr и Be) и отдельными элементами-сидерофилами (Sc, Fe, Cr, Ni, Co) (табл. 2; рис. 2). Они отличаются пониженными содержаниями элементов-халькофилов (Cu, Pb, Zn, Cd, Ga, Se, Te, Hg) и отдельных литофилов (Li, Rb, В, V, Th). Такой тип геохимических ассоциаций элементов в углях хорошо согласуется с общей геохимической специализацией интрузивно-вулканогенных и осадочных образований региона (Ильинский, 1985).

Полученные нами оценки средних содержаний редких элементов как для отдельных бассейнов, так и для региона в целом, отличаются от более ранних оценок других авторов (Башаркевич и др., 1984; Металлогения и геохимия, 1988). Эти отличия заключаются не только в более обширном спектре изученных элементов, но и в более высоких их содержаниях. Последнее обстоятельство обусловлено применением современных количественных методов прямого определения элементов в пробах без предварительного озоления.

Вместе с тем нельзя не отметить, что в основном подтвердилась относительная обогащенность углей отдельных ранее изученных бассейнов определенными группами элементов.

Геохимическая специализация первого рода позволяет очертить круг элементов, накапливающихся в угольных бассейнах и в целом в Центральной Сибири в количествах, определяющих геохимический фон элемента. Очевидно, что это будут не все элементы, определяющие геохимическую специализацию структур обрамления бассейнов, а только те из них, что способны избыточно накапливаться в углях, т.е. типоморфные или углефильные по терминологии Я.Э.Юдовичу (1985; 2002). При средней зольности углей региона 11,5 % содержание неуглефильных и слабоуглефильных элементов, накапливающихся в виде кластогенного материала, в угольных пластах разбавлено в 5-10 раз органической массой. Следовательно, они лишь в исключительных случаях могут формировать надкларковые содержания. Этот вывод можно проиллюстрировать, сравнив угли разных регионов мира (рис. 2). Как видно на графике, по ряду элементов все они имеют близкую геохимическую специализацию.

Специализация второго рода, указывающая на наличие предпосылок к образованию промышленных концентраций элементов, может быть оценена по методике А.А. Смыслова (Смыслов и др., 1996). Она устанавливается путем сравнения максимально

Среднее содержание редких элементов в углях Центральной Сибири

Угольный бассейн, месторождение	A <sup>d</sup> , %	Содержание элементов, г/т																									
		Li	Rb	Cs	Sr	Be	Sc	Y	Ga	Ge	Zr	Hf	Th	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	V	Nb	Ta	U	Ag	Au*	Sb
Девонская эпоха угленакопления																											
Барзасское	32,5	19,1	36,0	2,8	61	2,3	6,4	35,5	7,1	2,7	144	2,9	3,9	35	68	5,4	1,7	0,7	1,5	0,31	47,5	21,3	0,7	3,2	0,018	9,5	0,3
Убруское	49,2	12,9	22	1,6	395	2,5	8,7	33,4	2,7	<1,0	604	8,2	3,1	38	79	17,8	6,9	3,1	5,7	1,31	43,5	3,9	0,51	27,2	0,05	21	4,4
среднее	35,3	18,1	33,7	2,6	117	2,3	6,8	35,2	6,4	2,3	220	3,7	3,8	36,1	70	7,5	2,5	1,1	2,2	0,48	46,8	18,4	0,7	7,2	0,023	11,4	0,95
Карбон-пермская эпоха угленакопления																											
Горловский	7,0		6,3	0,39	195		2,9					1,1	1,9	8,2	21,0	1,8	0,39	0,19	0,77	0,18			0,08	1,0		7,9	0,11
Кузнецкий	13,5	14,8	15,0	1,6	248	4,6	3,9	15,4	7,0	0,9	138	2,1	3,3	12,3	24,7	2,6	0,64	0,43	1,30	0,34	14,7	11,0	0,47	2,4	0,05	7,5	0,26
Минусинский	17,6	10,1	3,8	0,67	288	2,5	8,2	13,6	2,9	5,7	63	2,6	3,1	14,4	37,0	2,2	0,76	0,70	1,1	0,45	25,1	7,4	0,32	3,0	0,011	2,8	1,2
Тунгусский	12,0	6,7	7,4	0,8	239	2,0	3,9	4,8	4,2	0,2	43	2,3	3,7	8,5	19,7	1,9	0,5	0,4	0,8	0,24	12,2	2,8	0,5	3,3		4,1	0,8
Курайское	25,2	20,0	16,7	1,0	686	2,0	6,9	18,5	4,7	0,2	79	2,7	4,2	38,2	44,1	4,8	1,5	0,75	2,0	0,51	7,5	4,9	0,49	1,1	0,011	2,6	0,01
среднее	12,4	8,7	9,3	1,0	241	2,7	4,0	7,6	4,9	0,5	67	2,2	3,7	9,5	21,2	2,1	0,5	0,4	1,0	0,27	13,0	4,9	0,5	3,0	0,05	3,1	0,68
Мезозойская эпоха угленакопления																											
Пыжинское	6,5	4,5	15,3	1,3	36	0,8	2,9	4,9	1,0		47	0,7	0,9	4,9	5,8	1,0	0,5	0,23	0,54	0,17		6,0	0,08	0,95		2,4	0,5
Канско-Ачинский	9,8	2,8	1,4	0,10	375	1,2	2,9	5,9	2,3	0,3	29,3	0,59	0,97	3,4	8,1	0,82	0,32	0,22	0,45	0,11	8,3	2,7	0,03	3,2	0,02	6,1	0,31
Иркутский	8,5			0,06		2,0	5,7	7,3	0,6		40	0,98	2,8	12,3	14,9	2,9	0,66	0,45	1,4	0,28	0,9		0,22	1,9		3,5	0,7
Удугемский	9,5	1,6	1,8	0,55	250	1,7	2,3	5,1	1,4	0,3	21	0,68	1,2	4,3	8,2	1,0	0,34	0,19	0,40	0,11	7,7	0,1	0,07	1,2	<0,01	2,5	0,27
Западно-Сибирский	10,5	4,2	3,5	1,1	213	5,4	16,0	17,0	2,1	2,7	126	3,3	2,3	8,2	16,6	2,5	0,83	0,67	2,1	0,47	15,6	5,5	0,05	1,2	0,006	30,0	7,1
Тунгусский	12,6	6,7	6,8	0,06	117	0,7	3,9	5,5	0,3	0,2	30	0,66	0,8	5,1	6,7	0,9	0,49	0,25	0,40	0,10	1,6	0,4	0,02	2,1	0,006	1,5	0,01
Кузнецкий	17,3		10	0,6	450	0,6	6,4	3,0	3,0		30	0,41	2,2	7,0	13,3	2,2	0,64	0,73	0,88	0,28	6,0	7,0	<0,05	2,1	<0,01	2,4	0,49
Среднее для АССО	10,1	2,6	1,7	0,14	357	1,2	3,2	5,8	2,2	0,25	30	0,61	1,1	4,0	8,7	1,0	0,35	0,26	0,52	0,13	7,8	2,6	0,04	3,0	0,020	5,5	0,34
среднее	10,5	4,2	3,4	1,0	217	5,2	15,6	16,7	2,1	2,6	123	3,3	2,3	8,1	16,4	2,5	0,81	0,66	2,0	0,46	15,4	5,5	0,05	1,2	0,006	29,0	6,9
Кайнозойская эпоха угленакопления																											
Западно-Сибирский	30,7	16,1	2,6	0,99	159	1,9	13,3	11,4	2,6	0,6	42	2,0	3,5	18,5	24,2	4,3	1,51	0,54	2,1	0,76	21,0	5,3	0,13	4,6	0,021	10,6	0,43
Талду-Дюргунское	19,8	3,4	14,5	1,6	411	0,5	9,1	5,0	0,4	0,5	38	0,80	1,1	7,3	6,6	2,0	0,71	0,36	1,3	0,73	8,4	1,5	0,03	1,7	0,11	6,8	1,1
среднее	30,7	16,1	2,6	0,99	159	1,9	13,3	11,4	2,6	0,6	42	2,0	3,5	18,5	24,2	4,3	1,5	0,54	2,1	0,76	21,0	5,3	0,13	4,6	0,021	10,6	0,43
Кайнозойская эпоха торфонакопления																											
Торф погребенный	46,1		44	4,4	138		9,3					1,9	5,1	15,4	28,9	2,8	0,78	0,56	1,6	0,27			0,53	3,7			0,87
Торф современный	8,7		4,1	0,33	88		1,0					0,29	0,8	4,1	7,3	0,74	0,14	0,13	0,20	0,04			0,07	2,0		6,0	0,15
Среднее для региона	11,5	5,1	3,9	1,0	214	4,8	4,2	15,5	2,3	2,3	113	3,1	2,4	8,6	17,0	2,5	0,81	0,62	1,9	0,45	15,3	5,3	0,09	1,5	0,011	25,4	5,9

Примечание: \* - в мг/т; A<sup>d</sup> - зольность

аномальных содержаний элементов в углях с их кларками в земной коре. Результаты изображаются в виде круговой диаграммы, наложенной на круговую диаграмму геохимической специализации первого рода (рис. 3) и в виде формул геохимической специализации (рис. 4). Коэффициенты перед элементами в формуле характеризуют

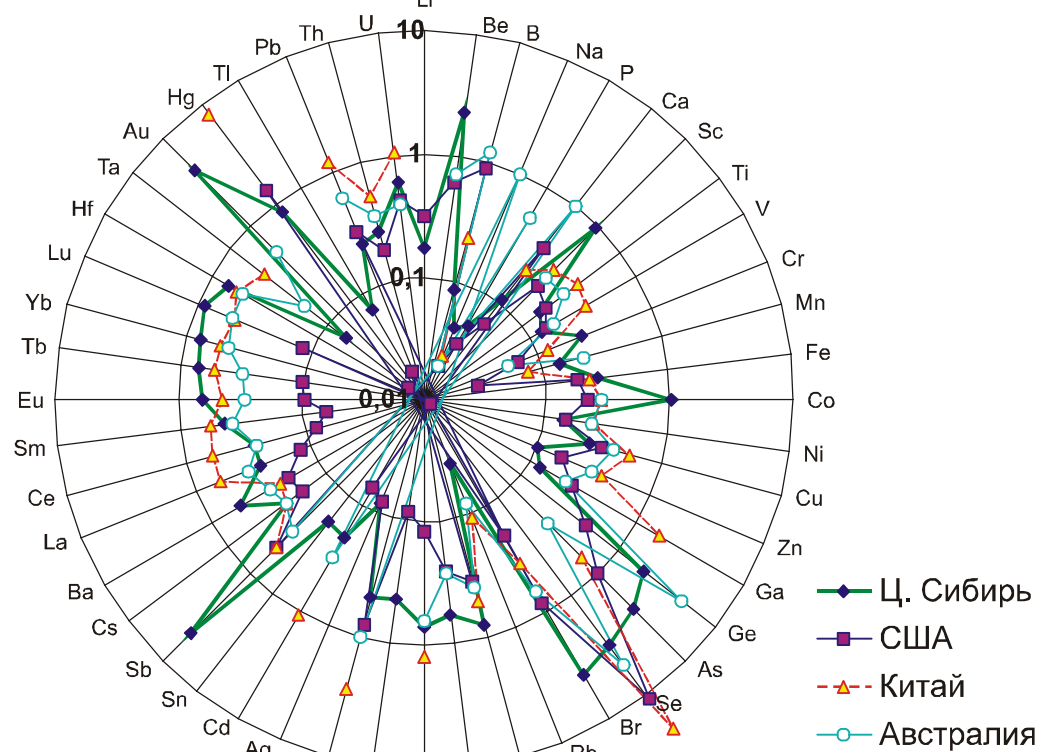


Рис.2. Нормированные (к среднему в земной коре) графики распределения элементов в углях Центральной Сибири, США, Австралии и Китая

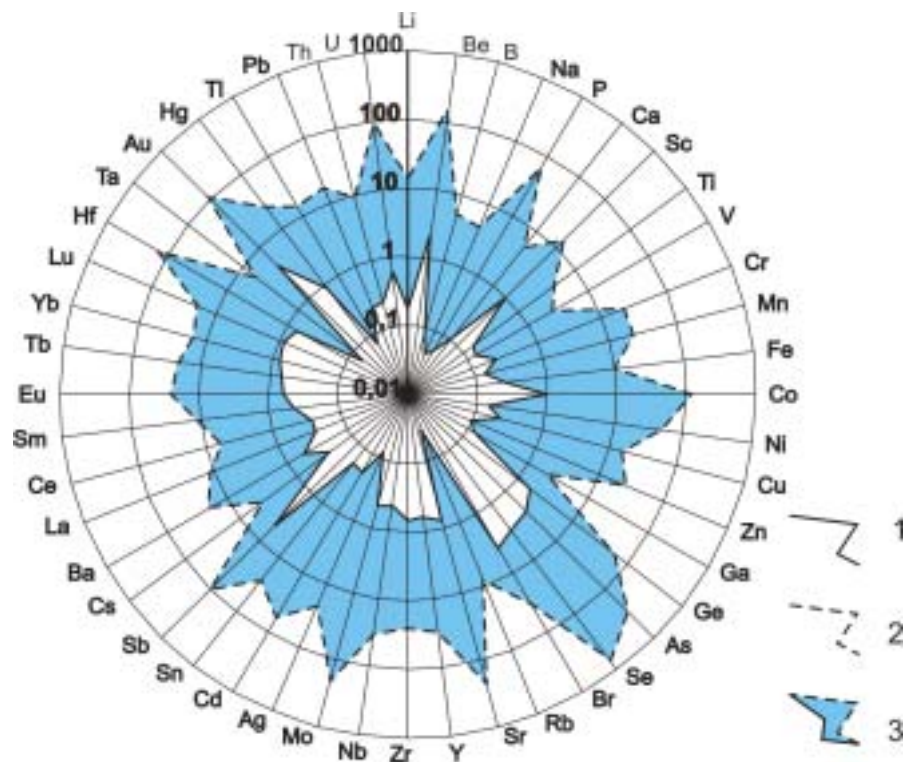


Рис.3. Элементы-примеси в углях Центральной Сибири.

Содержание элемента выражено через коэффициент концентрации Кк, рассчитанный по среднему в верхней части земной коре: 1 – Среднее содержание элемента; 2 – наибольшее локально высокое содержание элемента; 3 – поле локально высоких содержаний

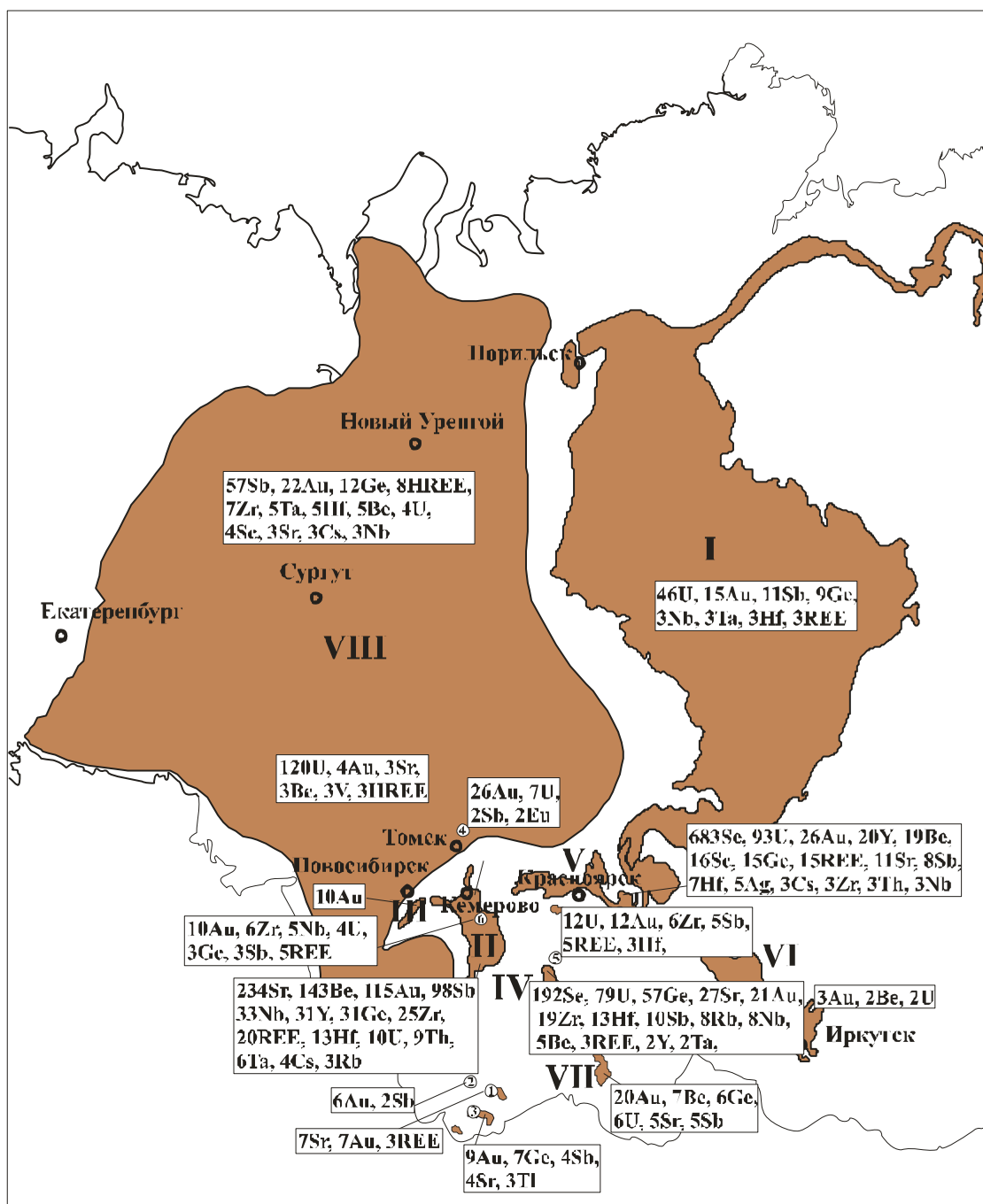


Рис. 4. Карта редкометалльной специализации углей Центральной Сибири

контрастность аномалий.

Этот тип геохимической специализации тесно связан со специализацией первого рода, в то же время отличается от нее, так как зависит не столько от общего геохимического фона структур обрамления, сколько от наличия источников, способных сформировать контрастные геохимические аномалии. Это могут быть разрушающиеся месторождения или специализированные комплексы горных пород в структурах обрамления, вулканогенный материал (пеплопады и др.), гидротермальная активность или поступление в пласт грунтовых или подземных вод, обогащенных рудными элементами. Обычно она формируется на фоне геохимической специализации 1 рода.

Исследования показали, что наиболее контрастные аномалии в углях Центральной



Сибири образуют Se, As, Sr, Mo, Be, Co, Au, Sb, U, Ge, Nb, Y, Zr, HREE, Br, Hg и Cd (рис. 3). Многообразие обстановок угленакопления определили большое разнообразие геохимических и минерогенических характеристик угольных бассейнов и месторождений. Геохимические особенности области сноса наряду с палеогеографическими обстановками влияли на геохимическую специализацию угольных бассейнов. Вместе с тем, наряду со специфическими особенностями отдельных бассейнов, просматриваются и общие черты геохимической специализации углей региона, особенно отчетливые для группы редких металлов. Для всех угольных бассейнов характерен смешанный литофильно-халькофильно-сидерофильный тип геохимической специализации с различным соотношением геохимических ассоциаций. Этот факт согласуется с данными геохимического районирования Алтае-Саянской складчатой области (Ильинский и др., 1985). Согласно полученным ими материалам, все основные угленосные впадины на территории АССО характеризуются смешанным типом геохимической специализации, несмотря на литофильно-сидерофильную или халькофильно-сидерофильную специализацию структур обрамления.

Исследования показали, что угли Центральной Сибири специализированы на Be, Ge, Se, Au, Sc, U, Co, As, Sb, Mo, Nb, Y, Zr и лантаноиды. Высокая контрастность аномалий редких элементов позволяет прогнозировать высокую вероятность выявления месторождений и угольных пластов с промышленно значимыми содержаниями Ge, Se, Au, Sc, U, Be, Nb, Zr, Y и лантаноидов. Этот вывод согласуется с выявлением в регионе промышленных концентраций Ge (Минусинский бассейн, Кузбасс, Западно-Сибирский бассейн), контрастных аномалий Au (Кузбасс, Западно-Сибирский бассейн), Sc (Минусинский бассейн, Западно-Сибирский бассейн), U (Канско-Ачинский, Иркутский, Западно-Сибирский бассейн), Be (Тунгусский бассейн), Nb, Zr, Y, REE (Кузбасс), Mo (Убруское месторождение).

В результате исследований установлено изменение геохимической специализации углей региона в процессе эволюции угленакопления. Изменение геотектонического режима осадконакопления практически на всей территории Центральной Сибири носило синхронный и региональный характер. Поэтому здесь возможна достаточно надежная корреляция угленосных формаций палеозойского, мезозойского и кайнозойского уровней угленакопления. Это позволяет изучить эволюцию редкометалльного состава углей как в отдельных бассейнах, так и в Центральной Сибири в целом.

Особенностью палеозойской эпохи угленакопления в Центральной Сибири является значительное влияние на углеобразовательный процесс вулканической деятельности. Это выразилось в повсеместном обогащении углей D и C-P возраста литофильными, в том числе умеренно и слабоуглефильными элементами, такими как Zr, Hf, Y, REE, Nb, Ta, Th и U. На участках с более мощными прослоями пирокластики уровни накопления этих элементов-примесей в углях могут достигать промышленно значимых величин (Середин, 1994; Арбузов и др., 2003).

Мезозойская эпоха угленакопления в регионе существенно золотоносна, скандиеносна и германиеносна. Если германиеносность ограничена меловыми лигнитами Западно-Сибирского и Тунгусского бассейнов, то скандиеносность и золотоносность – почти повсеместное явление. Аномальные уровни накопления этих элементов характерны для золы углей Западно-Сибирского, Канско-Ачинского,

Иркутского и Кузнецкого бассейнов. Особенно ярко золотоносность и скандиенность проявлена в Западно-Сибирском бассейне (Арбузов и др., 2004).

Кайнозойская эпоха угленакопления отчетливо унаследует геохимическую специализацию мезозоя. Но она имеет и свои особенности. Содержание большинства редких элементов-примесей в углях кайнозоя ниже, чем в мезозойских углях (табл. 2). Еще ниже их содержание в современных торфах.

Одной из наиболее характерных отличительных особенностей кайнозойской эпохи в регионе является ее высокая ураноносность. Угли Сибири этого возраста практически на всей территории “заражены” ураном. Кайнозойское уранонакопление оказало влияние и на мезозойские угли. Контрастные аномалии U установлены в юрских углях Итатского, Березовского и Козульского месторождений, в палеогеновых углях Яйского и Усманского месторождений. Здесь же известно промышленное гидrogenное Малиновское месторождение урана (Долгушин и др., 1995). Источником урана служат специализированные интрузивно-вулканогенные комплексы, распространенные в структурах обрамления угленосных впадин. По ряду признаков основная масса известных радиоактивных аномалий в юрских углях Центральной Сибири имеет молодой возраст. На это же указывает и связь урановых аномалий в углях Канско-Ачинского бассейна с участками четвертичного окисления угольных пластов (Гаврилин, Озерский, 1996) и наличие в регионе многочисленных ураноносных торфяников (Росляков и др., 2004).

Таким образом, исследования показали, что для Центральной Сибири характерна эволюция редкометалльного состава углей от палеозоя к кайнозою. Палеозойские угли специализированы на литофильные редкие металлы, такие как Zr, Hf, Y, REE, Nb, Ta, Th, Ge и Sc, мезозойские – на Au, Sc и Ge, а кайнозойская – на Au, Ge и U.

Из группы редких элементов, характеризующихся высокими уровнями накопления в углях и золах углей, практический интерес в настоящее время как самостоятельные полезные ископаемые могут представлять Ge, Au, Sc, U, Nb, Ta, Y, Zr и лантаноиды.

**Германий.** Оценка германиеносности углей Центральной Сибири с разной степенью детальности выполнена для подавляющего числа месторождений и бассейнов. Запасы металла промышленных категорий установлены в энергетических углях Черногорского месторождения Минусинского бассейна (Горький, 1972) и в двух месторождениях коксующихся углей Кузбасса (Кац и др., 1998). Прогнозные ресурсы германия, подсчитанные для меловых лигнитов одного только Нижне-Касского участка восточной окраины Западно-Сибирского бассейна, составляют по сумме категорий  $P_2 + P_3$  11 тыс. т. (Евдокимов и др., 2004). Высокогерманиеносные угли известны и в других районах Западно-Сибирского и Тунгусского бассейнов (Горький, 1972; Еханин и др., 1997).

Вовлечение германиеносных углей региона в промышленную переработку с целью извлечения металла ограничивается разными причинами. Получение германия из коксующихся углей Кузнецкого бассейна сдерживается отсутствием встроеной в основной технологический процесс коксования адаптированной для конкретных углей технологии его извлечения. Традиционная технология, используемая для извлечения металла из донецких углей, требует доработки в применении к углям Кузбасса (Кац и др., 1998).

Получение германия из энергетических углей Минусинского бассейна ограничено низким содержанием металла. Запасов Ge достаточно для создания оптимального по

мощности производства, но невысокие его концентрации не позволяют создать рентабельное производство, ориентируясь только на Ge (Арбузов и др., 2003). Положительным моментом здесь может считаться высокое содержание в углях и золах углей скандия. Совместное извлечение этих металлов может обеспечить необходимую рентабельность производства.

Освоение высокогерманиеносных лигнитов восточной окраины Западно-Сибирского бассейна ограничивается удаленностью объектов отработки, суровыми климатическими условиями, сезонным характером добычи, обогащения и транспортировки. Но даже в этих условиях возможно рентабельное получение металла (Евдокимов и др., 2004).

Другие участки в юго-восточной части Западно-Сибирского бассейна с высокими (иногда с ураганными до 0,6%) содержаниями германия изучены крайне слабо и поэтому в ближайшей перспективе в качестве источника его получения не рассматриваются.

**Скандий** – один из наиболее перспективных элементов для рентабельного извлечения из углей. На территории Центральной Сибири имеется несколько угольных месторождений, пригодных для организации промышленного получения Sc.

Наибольший интерес представляют угли хорошо освоенного Черногорского месторождения Минусинского бассейна (Арбузов и др., 2003). Расчеты показывают, что в Черногорском месторождении ресурсный потенциал Sc достаточно велик. Имеющихся ресурсов металла достаточно для создания на базе углей месторождения крупного производства по попутной добыче Sc и других элементов-примесей. Один только пласт Двухаршинный способен обеспечивать современное мировое потребление этого металла в течение нескольких десятилетий (табл. 3). Такими же перспективами обладают пласты Малый, Новый, Безымянный Черногорского месторождения, а также пласты 16, 16а, 19<sup>а</sup> Бейского месторождения.

Аномальный Sc характерен и для бурых углей отдельных месторождений Канско-Ачинского бассейна. Расчет прогнозных ресурсов выполнен для Бородинского, Саяно-Партизанского и Большесырского месторождений в связи с тем, что здесь выявлены возможно промышленно значимые концентрации Sc и установлены обогащенные им угольные пласты (табл. 4).

Расчеты показали, что ресурсный потенциал Sc в Бородинском и Саяно-Партизанском месторождениях достаточен для создания на их базе крупного производства по попутной добыче металла.

Таблица 3

Ресурсы ценных элементов-примесей в углях Черногорского месторождения, г/т  
(по Арбузов и др., 2003)

Месторождение, бассейн	Запасы (ресурсы) угля, тыс. т.	Ресурсы, т							Категория
		Sc	Ge	V	Zr	Y	Au	PЗЭ	
Черногорское	1620263	13853	8895	62850	93327	16769	4,81	63725	P <sub>1</sub>
В т.ч. пласт Двухаршинный	5000 (50000)	68,5 (685)	25,7 (257)	194 (1940)	288 (2880)	51,8 (518)	0,015 (0,15)	196 (1960)	P <sub>1</sub> P <sub>2</sub>
В целом по бассейну	24862289	205860	93979	754073	409692	304314	62,7	1266485	P <sub>2</sub>

## Ресурсы ценных элементов-примесей в углях отдельных месторождений Канско-Ачинского бассейна

Аномально высокая скандиенность установлена и для бурых углей юрского возраста Западно-Сибирского бассейна. Здесь содержание Sc в золе угля в ряде случаев превышает 0,2%. Однако перспективы его промышленного извлечения из этих углей в ближайшей перспективе не просматриваются в связи со значительной глубиной залегания углей. Необходимо исследование районов, где угольные пласты этого возраста доступны для отработки. Такие пласты распространены в западной приуральской части бассейна.

**Золото.** Несмотря на то, что нами в последние годы выполнен довольно большой объем исследований в различных бассейнах, золотоносность углей Центральной Сибири оценена все еще недостаточно. Кроме известных фактов наличия золотоносных углей в Кузбассе (Песков, Минко, 1994; Ценные и токсичные..., 1996; Арбузов и др., 2000; Нифантов и др., 2003), в последние годы аномальное содержание Au установлено в углях Минусинского, Канско-Ачинского и Западно-Сибирского бассейнов (Арбузов и др., 2002, 2003, 2004).

Перспективы извлечения золота из углей региона специально не изучались. Небольшой объем исследований, выполненный А.М. Сазоновым с коллегами, показал, что из золо-шлаковых отходов от сжигания бурых углей основных промышленных месторождений Канско-Ачинского бассейна гравитационными методами оно почти не извлекается (Сазонов и др., 1997; 1998). Вместе с тем, судя по содержанию Au в лабораторной золе угля, оно может попутно извлекаться из отходов сжигания углей Саяно-Партизанского, Бородинского и Большесырского месторождений.

Решение вопроса об организации производства по извлечению золота из углей и отходов их переработки должно предваряться комплексом поисково-оценочных работ. Необходимо выполнить оценку ресурсной базы металла на перспективных участках и в золотовалах и провести лабораторно-технологические и промышленные испытания по извлечению металлов. Такие работы проведены для золотовала Рефтинской ГРЭС в Челябинской области (Леонов и др., 1998) и золоотвалам г. Хабаровска (Бакулин и др., 2003). В Центральной Сибири на данном этапе их необходимо сосредоточить в Кузбассе, Минусинском и отдельных перспективных месторождениях Канско-Ачинского бассейна.

**Тантал, ниобий, цирконий, гафний и редкоземельные элементы.** Наиболее

высокие концентрации этих металлов установлены в углях Кузнецкого бассейна (Рихванов и др., 1990; Середин, 1994; Арбузов и др., 2000). Аномальные их содержания отмечены также в углях и золах углей Минусинского и Канско-Ачинского бассейнов (Арбузов и др., 2003).

*Ниобий.* В Кузбассе его содержание в золе угля пласта XI достигает 2000 г/т при среднем значении 146 г/т (Арбузов и др., 2000), в Минусинском бассейне в пласте XXXa – 220 г/т (Арбузов и др., 2003).

В каменных углях Кузнецкого бассейна аномальные концентрации Nb фиксируются не только в тонких контактовых зонах угольных пластов, но и в более значительных по мощности интервалах и даже в целых пластах мощностью до 9 метров. Такие пласты установлены на разрезе Сибиргинском, где содержание ниобия в пласте IV-V составляет 35 г/т (360 г/т золы). Аномальные содержания Nb в углях Сибиргинского разреза коррелируют с повышенными содержаниями Zr и REE.

Наибольшие известные в настоящее время в углях региона концентрации Nb установлены в золах углей верхней части пласта XI, где они достигают 0,2 %, что даёт в пересчёте на уголь 300 г/т. Мощность резко обогащённого участка составляет в среднем 0,2 - 0,3 м, хотя относительно обогащена Nb вся верхняя часть пласта от 1,2 до 1,5 м, а иногда и нижняя. Наряду с ниобием в углях и углистых породах пласта XI выявлены высокие концентрации лантаноидов (La до 215 г/т, Ce до 308 г/т), иттрия (до 165 г/т) и циркония (до 1950 г/т).

Повышенные концентрации Nb, приближающиеся к возможно промышленно значимым, отмечены в отдельных угольных пластах Канско-Ачинского бассейна. Однако невысокие уровни накопления металла не позволяют рассматривать их в качестве самостоятельного сырьевого источника ниобия. Здесь его перспективы могут быть связаны только с комплексом попутных элементов.

*Тантал.* В отличие от относительно распространенных ниобийсодержащих угольных пластов, танталоносные угли известны лишь в Кузбассе (Арбузов и др., 2000). Впервые аномальные концентрации тантала были установлены нами в 1990 г. при анализе проб товарной продукции пласта XI кемеровской свиты шахты им. Шевякова. Детальные исследования, проведённые в пределах горных отводов шахты им. Ленина, разреза Ольжерасский (Рихванов и др., 1994) показали, что повышенные концентрации Ta в разрезе пласта XI приурочены к прослою (партингу), сложенному углистыми алевролитами и алевропесчаниками мощностью 0,1 - 0,13 м., подстилающему верхнюю пачку ниобиеносных редкометальных углей. Партинг прослеживается по латерали с запада на восток на расстояние до 5 км и более. Площадь его распространения по самым осторожным оценкам превышает 10 км<sup>2</sup>. Среднее содержание Ta в алевролитах прослоя составляет 42 г/т, максимальное 71 г/т, что в 10 - 30 раз превышает фон для углевмещающих пород (2,9 г/т). В направлении с запада на восток концентрация элемента имеет тенденцию к увеличению, достигая максимума в пределах горного отвода шахты им. Шевякова. В соответствии с классификацией монометалльных месторождений Ta и Nb по качеству руд (Солодов и др., 1987), породы партинга по содержанию этих элементов представляют собой рядовые (иногда богатые) руды для экзогенных месторождений. Ресурсы металла предварительно оцениваются нами в размере 100т. (Арбузов и др., 2000). Концентрации ниобия в породах прослоя, хотя и значительно повышены, но всё же не достигают минимальных промышленных значений для монометалльных месторождений.

Высокие концентрации Та (10-30 г/т) и повышенные содержания большой группы элементов, характерных для аномального прослоя в XI пласте, установлены также в песчаниках кровли XX пласта, алевролитах почвы пласта XI, углистых алевролитах, слагающих прослой в верхней части пласта IV-V. Это позволяет нам прогнозировать более широкое распространение редкометалльного оруденения подобного типа в стратиграфическом разрезе кемеровской и промежуточной свит на юге Кузбасса. Такие же содержания Та отмечены и в Минусинском бассейне.

**Уран.** Ураноносны в Центральной Сибири окисленные бурые угли и лигниты. Проявления и мелкие месторождения урана известны в Канско-Ачинском, Иркутском и Западно-Сибирском бассейнах (Смыслов и др, 1996; Гаврилин, Озерский, 1996 и др.). Во всех изученных случаях урановое оруденение не сингенетично углеобразованию, а связано с наложенными процессами. Наиболее крупные проявления: Итатское, Яйское, Усманское и др., - обусловлены наложенными гипергенными процессами новейшей эпохи ураноаккумуляции. Число таких аномалий весьма велико. Они зафиксированы на выходах угольных пластов под наносы на большинстве угольных месторождений Канско-Ачинского бассейна, на многих месторождениях Иркутского и Западно-Сибирского бассейнов. Мелкие уранопоявления известны и среди каменноугольных отложений Минусинского, Кузнецкого и Тунгусского бассейнов. Проводившаяся в 60-70 годы XX века оценка отдельных урановых проявлений в угольных пластах свидетельствует о неперспективности их для самостоятельной отработки в качестве уранового сырья. Перспективы переработки таких углей могут быть связаны только с необходимостью утилизации окисленных углей с целью уменьшения их воздействия на окружающую среду.

Появившиеся в последние годы технологии, позволяющие эффективно сжигать низкокалорийное высокосольное топливо при минимуме выбросов в окружающую среду открывает перспективы для утилизации и таких экологически опасных окисленных углей. Среди этих технологий можно выделить сжигание водноугольных суспензий и плазмокаталитическое сжигание на малогабаритных установках (Деягин и др., 2000; Мурко и др., 2000; Каренгин и др., 2002, 2003). Они позволяют утилизировать низкокачественное топливо, обеспечивая теплом и электроэнергией жилые здания или небольшие производственные мощности. Накапливающиеся при этом жидкие урансодержащие отходы могут рассматриваться как перспективный, хотя и незначительный по объему источник урана и других элементов-примесей.

**ПОЛОЖЕНИЕ 2. Выявлена латеральная и вертикальная неоднородность распределения редких элементов в углях Центральной Сибири, обусловленная спецификой формирования угольных бассейнов и месторождений. Причины, обусловившие неравномерное распределение элементов, разнообразны, но в основном они определяются особенностями минерализации и геохимии структур обрамления бассейнов, условиями угленакопления и механизмами поступления элементов в угольный пласт. В угольных пластах на этапе седиментогенеза и раннего диагенеза формируются зоны контактового обогащения редкими элементами, сохраняющиеся на всех стадиях углеобразовательного процесса (обоснование положения дано в главе 5).**

Латеральная и вертикальная изменчивость содержания редких элементов в угленосных отложениях в большинстве угольных бассейнов и месторождений изучены

с разной степенью детальности. Наиболее детально чаще всего изучается вертикальная неоднородность. Латеральная неоднородность распределения элементов изучается редко в связи ограниченными возможностями площадного опробования в пределах угольных бассейнов. Обычно доступны лишь отдельные участки или, реже, отдельные месторождения. Поэтому исследования обычно носят фрагментарный характер.

Наиболее всесторонне изучено распределение в углях германия и урана. (Зильберминц и др., 1936; Bregger et al., 1955; Травин, 1960; Сапрыкин, Богданов, 1967; Сапрыкин и др., 1968; Металлогения и геохимия..., 1988 и др.). Основные результаты получены в периоды уранового и германиевого бума, когда проводились специализированные поиски этих металлов. Самые многочисленные публикации посвящены лишь одному из вопросов проблемы распределения элементов в углях - их распределению по профилю угольного пласта. Наиболее полное обобщение по этому вопросу представлено в серии публикаций Я.Э. Юдовичем (Юдович, 1965, 1978, 1989; Юдович, Кетрис, 2002 и др.). Латеральная и стратиграфическая изменчивость содержания редких элементов в пределах бассейнов и месторождений изучена в меньшей степени. К числу ранних наиболее полных обобщений можно отнести работу Ю.Е. Баранова (1966), выделившего на основании анализа отечественных и зарубежных работ того периода и небольшого количества собственных данных некоторые “универсальные” закономерности, характеризующие накопление большинства редких элементов в углях. К таким “универсальным” закономерностям он отнес приуроченность относительно повышенных концентраций редких элементов к определенным зонам ископаемого торфяника, связь высоких содержаний редких элементов с определенными частями разреза угольного пласта, их корреляцию с зольностью углей или с составом золы и т.п.

Позднее было показано, что особенности распределения элементов-примесей в углях в каждом конкретном случае определяются набором различных факторов, влияющих на их накопление, и отражают геологическую историю формирования как угленосных отложений, так и региона в целом (Eskenazy, 1996 и др.). Поэтому для выявления общих закономерностей распределения редких элементов в угленосных отложениях рационально выполнение исследований последовательно от угольного пласта к месторождению, бассейну и региону в целом.

**Латеральная изменчивость.** Вывод о значительной латеральной неоднородности распределения элементов в углях следует из простого сравнения многочисленных данных о содержании элементов-примесей в различных угольных бассейнах и месторождениях (Сапрыкин и др., 1968; Ayanoglu, Gunduz, 1977; Китаев, Михайлов, 1979; Башаркевич и др., 1984; Металлогения и геохимия..., 1988; Ценные и токсичные..., 1996; Eskenazy, 1996; Бакулин, Черепанов, 2003 и др.). Все эти разнообразные данные указывают на влияние региональных металлогенических и геохимических особенностей горно-складчатого обрамления на уровни накопления редких элементов в углях. Кроме того, в ряде случаев на накопление редких элементов могли влиять процессы синхронного вулканизма и гидротермальной деятельности, происходившие как в пределах угленосных бассейнов, так и на удалении от них (Ферсман, 1915; Костин, Мейтов, 1972; Середин, 1995, 2002; Юдович, Кетрис, 2002 и др.). Эти и многие другие данные указывают на глобальную латеральную неоднородность содержаний элементов в углях. В то же время, неравномерность распределения редких элементов в пределах бассейнов изучена в меньшей степени.

Проведенные исследования показали, что для углей Центральной Сибири как для региона в целом, так и для отдельных бассейнов и месторождений характерна ярко выраженная латеральная изменчивость содержания редких элементов. Причины, обусловившие неравномерное площадное распределение элементов, разнообразны, но в основном они определяются особенностями металлогении и геохимии обрамления бассейнов и механизмами поступления элементов в угольные пласты. При терригенном и аквагенном поступлении элементов отчетливо обогащаются периферические части бассейнов. Аквагенное поступление элементов наиболее ярко фиксируется при анализе состава золы углей. Значительная роль аквагенного поступления элементов в угольный пласт часто сопровождается образованием многочисленных локальных, иногда весьма контрастных, аномалий. Обычно их расположение четко трассирует направление водного потока (рис. 5). Вулканогенное поступление кластогенного материала в виде пеплопадов может изменять характер распределения элементов, создавая аномалии на удалении от основной области питания. Однако при этом целостная картина латеральной изменчивости не меняется в связи с относительно равномерным поступлением пеплового материала на значительные территории.

Во всех случаях краевые части бассейнов, месторождений и угольных пластов, приуроченные к области питания, обогащены элементами-примесями по сравнению с центральными участками. Такой характер распределения элементов сохраняется и при выпадении пироклаستيкулы, так как суммарный вклад вулканогенного и

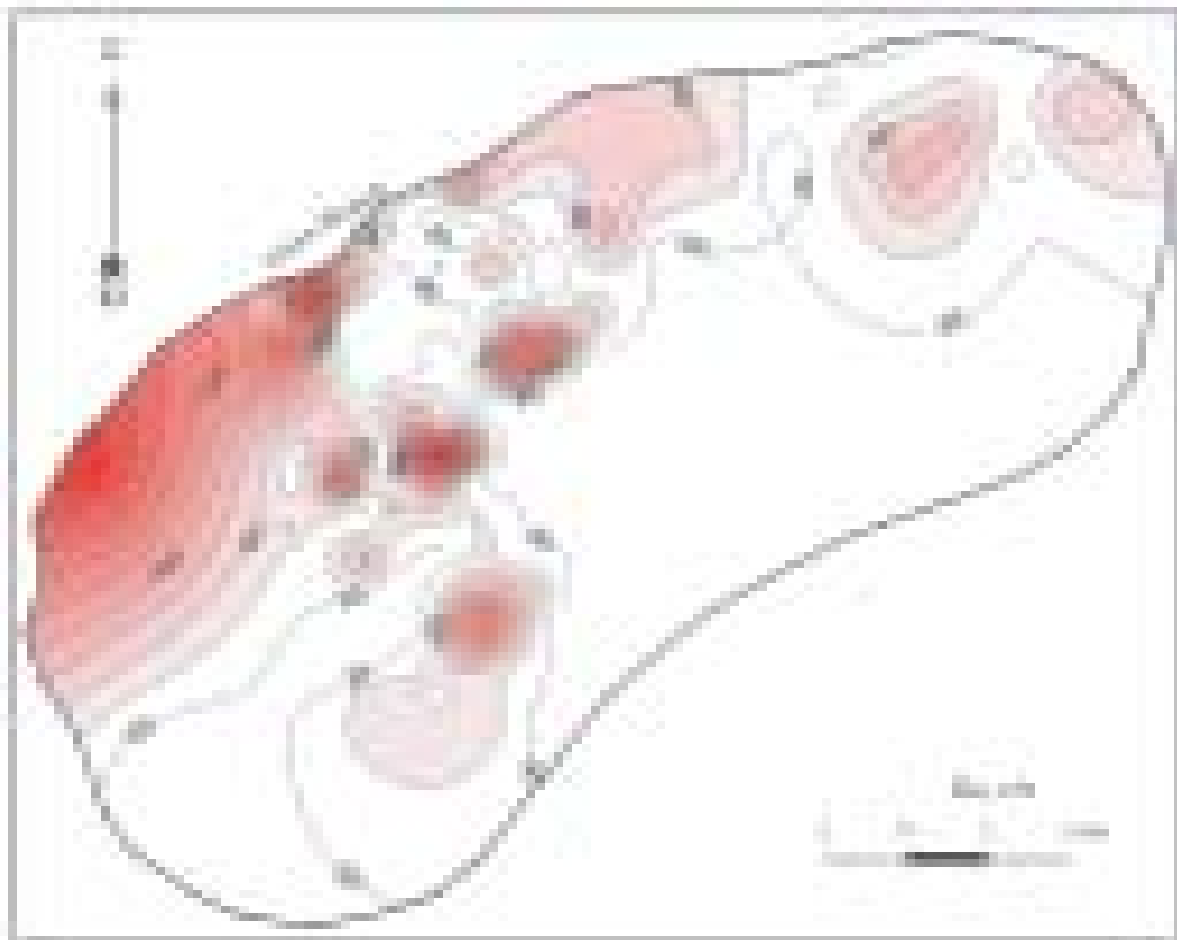


Рис.5. Распределение германия в золе угля пласта Новый Черногорского месторождения Минусинского угольного бассейна