# КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ИЗУЧЕНИИ МИГРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

***Т.А. Воробьева, А.В. Евсеев, Н.И. Тульская***
***Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова***
***Москва, Россия, tvorobyova@yandex.ru, avevseev@yandex.ru, tnadya@mail.ru***

# CARTOGRAPHIC APPROACHES FOR STUDY THE MIGRATION OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES

***T.A. Vorobieva, A.V. Evseev, N.I. Tulskaya***
***Lomonosov Moscow State University ,Geographical Faculty***
***Moscow, Russia, tvorobyova@yandex.ru, avevseev@yandex.ru, tnadya@mail.ru***

**Abstract**. Stages of creation of an information-cartographical database according to distribution of artificial radionuclides in landscapes are considered in the article. Necessity of use of geoinformation technologies is shown at ekologo-radiochemical researches. The technique of maps creation, which is based on the theory about river basins and representations about geochemical arenas, is described. The structure of geoinformation layers of an ekologo-radiochemical database is considered in detail. There are described sources for drawing up of cartographical layers, their maintenance and technology of creation. On the basis of the stated technique ekologo-radiochemical division into districts of Murmansk and Arkhangelsk areas is spent and the ekologo-radiochemical information-cartographical database of regional level is created.

Радиоэкологические исследования основываются на детальном ландшафтном геохимическом анализе территории с последующим составлением крупномасштабных карт, а также на мелкомасштабном картографировании и районировании обширных территорий по различным условиям миграции и концентрирования искусственных радионуклидов в ландшафтах. В результате создается картографическая база данных, отражающая геолого-геоморфологические и ландшафтно-геохимические особенности региона. Последняя позволяет разрабатывать мероприятия по предотвращению распространения радиационного загрязнения и прогнозировать поведение искусственных радионуклидов в окружающей среде в случае аварийных ситуаций на радиационно-опасных объектах.

Полноценный эколого-радиохимический мониторинг не возможен без использования современных геоинформационных технологий. Прежде всего, следует отметить, что для создания картографической базы данных необходимо изучение биоклиматических, геологических, геоморфологических, почвенно-геохимических особенностей и различий в морфологическом строении водосборных бассейнов исследуемой территории. Кроме того, источники экологической информации различаются по своему типу: это и различные разномасштабные картографические источники, и материалы ландшафтно-геохимических съемок, и данные дистанционного зондирования, и литературные источники. Таким образом, для объективного информационного обеспечения эколого-радиохимических исследований проводится обобщение и синтез обширной и многоплановой информации, что практически невозможно без использования геоинформационных технологий (Табл.1), которые позволяют не только совмещать различные картографические слои и атрибутивные данные, но и с использованием математико-картографического моделирования провести сложный пространственный анализ и синтезировать полученную информацию.

Методика мелкомасштабного эколого-радиохимического районирования апробировалась на территориях Мурманской и Архангельской областей [Воробьева и др., 2009]. С одной стороны, оба объекта имеют много схожих черт: суровый климат с продолжительной зимой и коротким вегетационным периодом, повышенная увлажненность, сильная заболоченность, расположение в трех природных зонах (от тундры до средней тайги), малая биологическая продуктивность экосистем. Но есть и существенные отличия. Для Мурманской области характерна большая дифференциация ландшафтов, сложная геолого-тектоническая структура и геоморфологическая неоднородность (от горных территорий и возвышенных плато до низменностей). В Архангельской области наблюдается меньшее разнообразие ландшафтов, рельеф в основном представлен слабоволнистой равниной, хорошо развита речная и озерная сеть. Особо хотелось отметить, что в Мурманской и Архангельской областях сильно различается бассейновая структура территории, и это имеет принципиальное значение для эколого-радиохимического мониторинга. Связано это со следующим.

Таблица 1.

*Состав и содержание эколого-радиохимической информационно- картографической базы данных регионального уровня*

| **Картографические источники** | **Создаваемые картографические слои** | **Содержание созданных карт** |
|---|---|---|
| Топографические карты | Водосборные бассейны | Бассейновая организация территории. Структура бассейнов разного порядка |
| Карты рельефа: гипсометрическая, геоморфологическая, морфологическая, геологическая, четвертичных отложений, ландшафтная<br>Карта растительности<br>Ландшафтная карта | Условия миграции и аккумуляции вещества | Дифференциация территории на участки с различной интенсивностью возможной миграции и аккумуляции вещества |
| Карты: почвенная, четвертичных отложений, почвенно-геохимическая | Геохимическая устойчивость почв к техногенному воздействию | Дифференциация территории на участки с различной устойчивостью почв |
| Карты водосборных бассейнов, морфометрические, условий миграции и аккумуляции вещества, геохимической устойчивости почв к техногенному воздействию | Геохимические арены | Морфометрическая структура водосборных бассейнов. Ранжирование водосборных бассейнов на потенциальные сбрасыватели, транзитные или накопители веществ |
| Карты: экономико-географическая, промышленных объектов, транспорта, энергетики | Потенциальные источники загрязнения | Размещение объектов – потенциальных источников радиационного загрязнения |
| Карты геохимических арен, условий миграции и аккумуляции вещества | Эколого-радиохимическое районирование территории по особенностям распространения искусственных радионуклидов | Дифференциация территории на районы с различной возможной способностью к накоплению или выносу радионуклидов и их характеристика |

Эколого-радиохимическое районирование основывается на понятии «геохимические арены» - территории водосборных речных систем и озер, определяющих распределение загрязняющих веществ, мигрирующих в поверхностных водах внутри арены, и возможность выноса загрязнителей за пределы арены или аккумуляцию внутри нее. Фундаментом исследования служит учение о морфологической структуре речных бассейнов [Новаковский и др., 2005; Симонов, 2003]. Работы по эколого-радиохимическому районированию разбиваются на несколько этапов:

- анализ бассейновой организации территории и определение структуры бассейнов разного порядка;
- дифференциация территории на участки с различной интенсивностью миграции и аккумуляции вещества на основе анализа геолого-геоморфологических и гидрографических особенностей территории;
- выявление участков почв с различными геохимическими условиями и с различной устойчивостью почв к техногенному воздействию;
- определение морфометрической структуры водосборных бассейнов и ранжирование водосборных бассейнов на потенциальные сбрасыватели, транзитные или накопители веществ;
- выявление потенциальных источников поступления искусственных радионуклидов;
- выделение районов с различной возможной способностью к накоплению или выносу радионуклидов.

Решение каждой из обозначенных задач завершается созданием геоинформационного слоя, и таким образом получается серия эколого-радиохимических карт. С одной стороны, каждый слой дает определенную характеристику территории и является самостоятельным материалом. С другой стороны, каждая предыдущая карта дает исходную информацию для последующих карт и, в конечном счете, позволяет провести интегральный анализ и выделить эколого-радиохимические районы на изучаемой территории.

На каждом из перечисленных выше этапов создания картографической базы данных используются те или иные преимущества геоинформационных технологий, но есть и одно общее свойство. Для получения качественно новой информации требуется обработка большого объема исходных материалов. Такой анализ очень трудоемок. Естественно, при «ручной работе» при нарастании количества исходных данных все больше будет сказываться «человеческий фактор» как на времени работы, так и, в конечном счете, на ее качестве.

Геоинформационные технологии, в свою очередь, позволяют избавить исследователя от «рутинных» операций и дают возможность сконцентрироваться на итоговом синтезе новой информации, экспертных оценках и разработке рекомендаций.

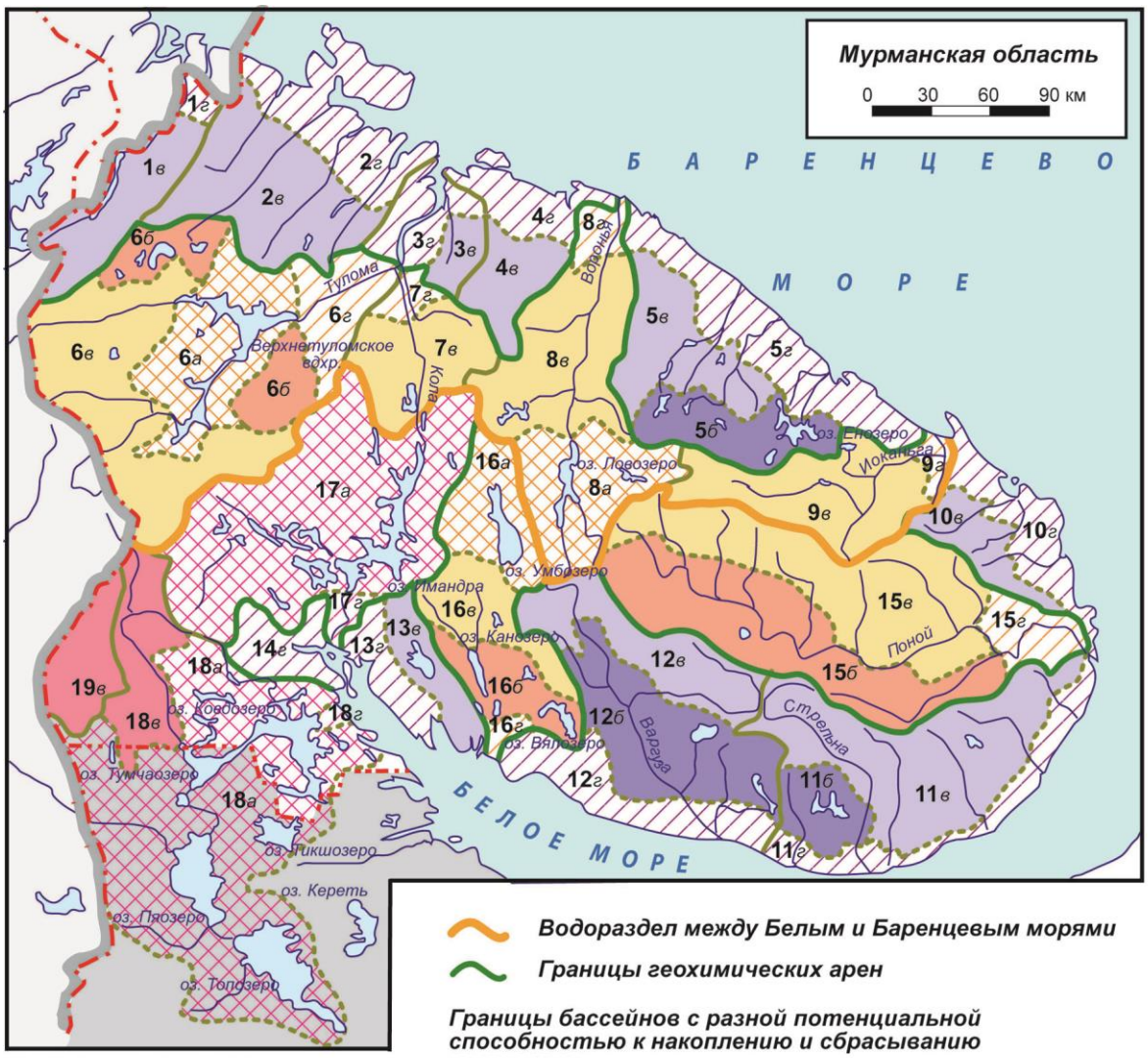
На первом этапе эколого-радиохимических исследований анализируется структура водосборных бассейнов рек и озер изучаемого региона. Согласно учению Ю.Г. Симонова о морфологическом строении речных бассейнов вынос вещества из водосборных бассейнов зависит от соотношения уклонов, длин водотоков разного порядка, площади и сложности строения бассейна и других «геометрических» характеристик. Существуют «транзитные» бассейны, в которых наблюдается определенное соответствие между приходом вещества со склонов выше лежащих частей русла с выносом вещества, а также бассейны-«сбрасыватели» (в которых вещества с верхних звеньев приносится меньше, чем выносится) и бассейны-«накопители» (в них преобладают процессы аккумуляции вещества). Отметим, что в каждом бассейне есть отдельные участки накопители, транзитные и сбрасыватели. По ходу развития бассейна (как в естественных условиях , так и при создании антропогенной нагрузки) его тип, а также места накопления и выноса вещества внутри него могут измениться. Все бассейны стремятся к равновесному, «транзитному» состоянию; для них существуют определенные соотношения между количеством, длинами, площадями и уклонами водотоков разного порядка. Сравнив параметры изучаемых бассейнов с модальными значениями, можно их ранжировать по потенциальной способности к накоплению-выносу вещества, в т.ч. искусственных радионуклидов.

Таким образом, для дальнейшей обработки необходимо получить информацию о порядках тальвегов по методике Стралера-Философова, их длинах, уклонах, площадях водосборов, а точнее о соотношении каждого из этих параметров в пределах речных бассейнов высокого порядка (Северная Двина, Онега и др. для Архангельской области, Поной, Тулома, Воронья и др. – для Мурманской). Источником для такого анализа служат топографические карты, которые позволяют наиболее точно описать структуру водосборных бассейнов. Определение перечисленных выше параметров для обширных территорий или для регионов с незначительным расчленением рельефа, таких как Архангельская область, представляет определенные сложности, и геоинформационные технологии являются существенным подспорьем для исследователя, позволяя ему избавиться от трудоемкой работы и сосредоточиться на экспертных оценках полученного материала. Уже стало традиционным создание на основе цифровых моделей рельефа гипсометрических и морфометрических (уклонов и экспозиции) карт. В последнее же десятилетие все шире внедряется программное обеспечение, позволяющее с использованием цифрового моделирования автоматически или автоматизировано выделять структурные линии водосборных бассейнов (тальвеги и водоразделы), определять порядки тальвегов, вычислять их длины, а также площади элементарных и крупных водосборных бассейнов.

В результате первого этапа эколого-радиохимического районирования в информационно-картографической базе данных создается слой бассейновой организации территории с информацией о порядках тальвегов и их геометрических характеристиках. Графическим отображением этого слоя является карта водосборных бассейнов рек и озер, позволяющая увидеть соотношения водотоков разного порядка и их длин и передать особенности структуры речных бассейнов региона.

Следующий этап заключается в выявлении степени активности миграции и аккумуляции искусственных радионуклидов. Для этого в информационно-картографическую базу необходимо внести информацию о геолого-геоморфологической структуре водосборных бассейнов, а именно провести сопряженный анализ сложившихся типов и форм рельефа, расчлененности рельефа, абсолютных и относительных высот, особенностей подстилающих и коренных пород, крутизны и длины склонов, а также дифференциации ландшафтной структуры, заозеренности и заболоченности территории, проявлении специфических для изучаемого региона процессов (в нашем случае - торфонакопления и карстовых процессов). Соответственно, блок исходной информации базы данных пополняется гипсометрической, геоморфологической, морфологической, геологической, четвертичных отложений и ландшафтной картами, а итогом их синтеза является слой зон миграции и аккумуляции, отражающий дифференциацию территории на зоны с различными условиями и интенсивностью возможного проявления процессов перераспределения радионуклидов.

В Мурманской области зоны миграции и аккумуляции занимают практически равные площади. Преобладают участки с активной и умеренной миграцией (на грядово-холмистых и возвышенных равнинах с высотами 200-400м и цокольных сильно расчлененных увалистых равнинах с высотами 150-300м) и со слабой аккумуляцией (на цокольных увалистых с высотами 150-300м и плоских с высотами ниже 150м заболоченных равнинах). Большая часть Архангельской области относится к зонам слабой и умеренной аккумуляции, представленными в основном плоскими низменными и плакорными волнистыми равнинами с абсолютными высотами 50-150м, часто сильно заболоченными. В целом в обоих регионах зоны интенсивной аккумуляции, которым, с точки зрения перераспределения искусственных радионуклидов, должно быть уделено повышенное внимание, занимают небольшие площади. К ним отнесены озерно-ледниковые и озерно-аллювиальные сильно заболоченные равнины, речные долины крупных рек, а также морские и аллювиально-морские равнины, расположенные в дельтах Сев. Двины и Онеги и на побережье морских заливов.




***Водораздел между Белым и Баренцевым морями***

***Границы геохимических арен***

***Границы бассейнов с разной потенциальной способностью к накоплению и сбрасыванию вещества:***

между крупными бассейнами
внутри крупных бассейнов

***Геохимические арены:***

**открытые**

- *б* аккумулятивно-транзитные
- *в* транзитно-аккумулятивные
- *г* сбрасыватели

**полузакрытые**

- *а* накопители
- *б* аккумулятивно-транзитные
- *в* транзитно-аккумулятивные
- *г* сбрасыватели

**закрытые**

- *а* накопители
- *в* транзитно-аккумулятивные
- *г* сбрасыватели

***Индексы геохимических арен:***

**2** - номер бассейна
*в* - тип миграции

***Индексами на карте обозначены:***

*Бассейны Баренцева моря*

1. Бассейны реки Патсойоки и др. (большая часть на территории Норвегии)
2 – 4 .Бассейны рек северной части Кольского полуострова
5. Бассейны рек северо-восточной части Кольского полуострова
6. Бассейны Верхнетуломского водохранилища и реки Тулома
7. Бассейны реки Кола
8. Бассейны реки Воронья и озера Ловозеро
9. Бассейны реки Иоканга

*Бассейны Белого моря*

10. Бассейны рек восточной части Кольского полуострова
11 – 12. Бассейны рек юго-восточной части Кольского полуострова
13. Бассейны рек северо-восточного побережья Кандалакшского залива
14. Бассейны рек северо-западного побережья Кандалакшского залива
15. Бассейны реки Поной
16. Бассейны реки Умбы и озера Умбозера
17. Бассейны озера Иманда и реки Нива
18. Бассейны рек Тумча, Тума и системы озер Топозеро, Пяозеро и др. систем водохранилищ
19. Бассейны реки Тенниейоки

*Рис. 1. Геохимические арены*

Если особенности строения рельефа во многом определяют условия латеральной миграции, то почвенные условия влияют на особенности радиальной миграции вещества. Поэтому в информационно-картографической базе данных организуется модуль оценки устойчивости почвенного покрова к загрязнению искусственными радионуклидами, т.е. способности почв к восстановлению нормального функционирования

после прекращения техногенного воздействия, которое проявляется через скорость самоочищения от продуктов техногенеза в результате выноса из почвенного профиля или перевода их в другое состояние. При этом учитываются способность накопления и интенсивность выноса искусственных радионуклидов из почвенных горизонтов, а также возможность их накопления на геохимических барьерах. Базовыми для такого анализа являются карты (и соответствующие слои в базе данных): почвенного покрова, четвертичных отложений, ландшафтно-геохимическая. Их синтез по методике М.А. Глазовской [Глазовская, 1997] позволяет выделить группы почв, сходных по условиям эколого-геохимической устойчивости не только к тяжелым металлам, но и к радиационному воздействию.

На изучаемых территориях хорошо прослеживается зональность почв, на фоне которой наблюдается большая пестрота почвенного покрова, связанная с характером материнских пород, формами рельефа и условиями увлажнения. В результате интерпретации исходных данных выделены 4 группы эколого-геохимической устойчивости почв: от очень низкой до средней. Группа с очень низкой устойчивостью занимает весьма незначительные площади; к ней приурочены тундровые, горно-подзолистые и некоторые другие типы почв. Напротив, группа почв наиболее устойчивых к загрязнению искусственными радионуклидами (средний уровень устойчивости) имеет довольно широкое распространение в Архангельской области и занимает большую часть Мурманской. Это болотные, торфянисто-подзолисто-глееватые и глеевые почвы, для которых не характерна миграция радионуклидов вглубь: наблюдаются аккумуляция на сорбционных барьерах в верхних горизонтах почв и слабое перераспределение по почвенному профилю.

Полученная на предыдущих этапах эколого-радиохимического исследования информация о структуре водосборных бассейнов, условиях миграции и аккумуляции вещества, геохимической устойчивости почв позволяет выделить на изучаемых территориях геохимические арены разного типа (рис.1). Поскольку источники, в отличие от предыдущих этапов, представляют собой сформированные картографические слои единой информационной базы данных, синтез исходной информации упрощается.

Открытые арены включают водосборные бассейны рек, характеризующиеся преобладанием процессов интенсивного выноса мигрирующих веществ за пределы их территории. Полузакрытые арены объединяют водосборные бассейны с преобладанием процессов замедленного транзита мигрирующих веществ и частичного осаждения их внутри арены. Закрытые арены включают водосборные бассейны рек и озер с преобладанием процессов осаждения из поверхностных вод мигрирующих веществ и их накопления внутри арены. В пределах этих арен находятся бассейны систем озер, водохранилищ и рек, впадающих в них, а также бассейны рек, не имеющих непосредственного выхода к морю.

Внутри каждой арены проведена дифференциация по различной степени интенсивности возможного проявления процессов перераспределении радионуклидов, и выделены участки бассейнов с преимущественной аккумуляцией (накопители), участки с преобладанием аккумуляции (аккумулятивно-транзитные), участки с преобладанием миграционных процессов (транзитно-аккумулятивные), участки с преимущественной миграцией (сбрасыватели). Кроме того, для Архангельской области стало возможным в пределах «переходных» типов бассейнов оценить и силу проявления преобладающего процесса (активная, умеренная, слабая).

Упомянутые выше картографические слои отражают те или иные аспекты возможного отклика геосистем на загрязнение искусственными радионуклидами. Но имеет также значение и сложившиеся типы природопользования, представляющие определенный риск распространения радионуклидов. В связи с этим необходимо создание слоя потенциальных источников загрязнения, информацией для которого служат общие экономико-географические карты и частные (промышленных объектов, транспорта, энергетики и др.). Очевидно, что для выявленных потенциально более опасных областей при принятии конкретных решений в области экологической политики необходимо проводить перечисленные выше исследования на локальном уровне в более крупных масштабах.

Экспертный анализ полученной информации, а именно совместное рассмотрение карт водосборных бассейнов, условий миграции и аккумуляции вещества, геохимической устойчивости почв к техногенному воздействию и геохимических арен позволил провести эколого-радиохимическое районирование (рис.2, 3). Итоговый картографический слой информационно-картографической базы данных отражает дифференциацию территории по особенностям распространения искусственных радионуклидов. Районы классифицируются на сбрасыватели и накопители, различные виды транзитных районов, в которых соответственно при попадании искусственных радионуклидов преимущественно происходят их вынос и накопление, наблюдается определенный баланс между приходом и выносом вещества. Особое внимание при проведении дальнейших работ и планировании хозяйственной деятельности должно быть уделено районам накопителям (в Архангельской области они занимают минимальные площади, а в Мурманской имеют довольно широкое распространение). Искусственные радионуклиды и другие техногенные загрязнители, попадая в эту зону, накапливаются и долго в ней сохраняются. Восстановление геохимических характеристик ландшафтов, расположенных в этой зоне, затруднено, так как потенциал их самоочищения очень низкий. Кроме того, в Архангельской области выделяются специфические по характеру перераспределения радионуклидов территории. Это, во-первых, районы с провальной карстовой миграцией на северо-западе области, где наблюдается вынос вещества в грунтовые воды с частичным его попаданием в более глубокие подземные воды с возможным выходом на поверхность за пределами этих районов. Уникален и дельтовый район (устье Северной

Двины): здесь активная аккумуляция происходит в аквальных ландшафтах дельты и морского залива и обусловлена специфическими процессами смешения морских и пресных вод.

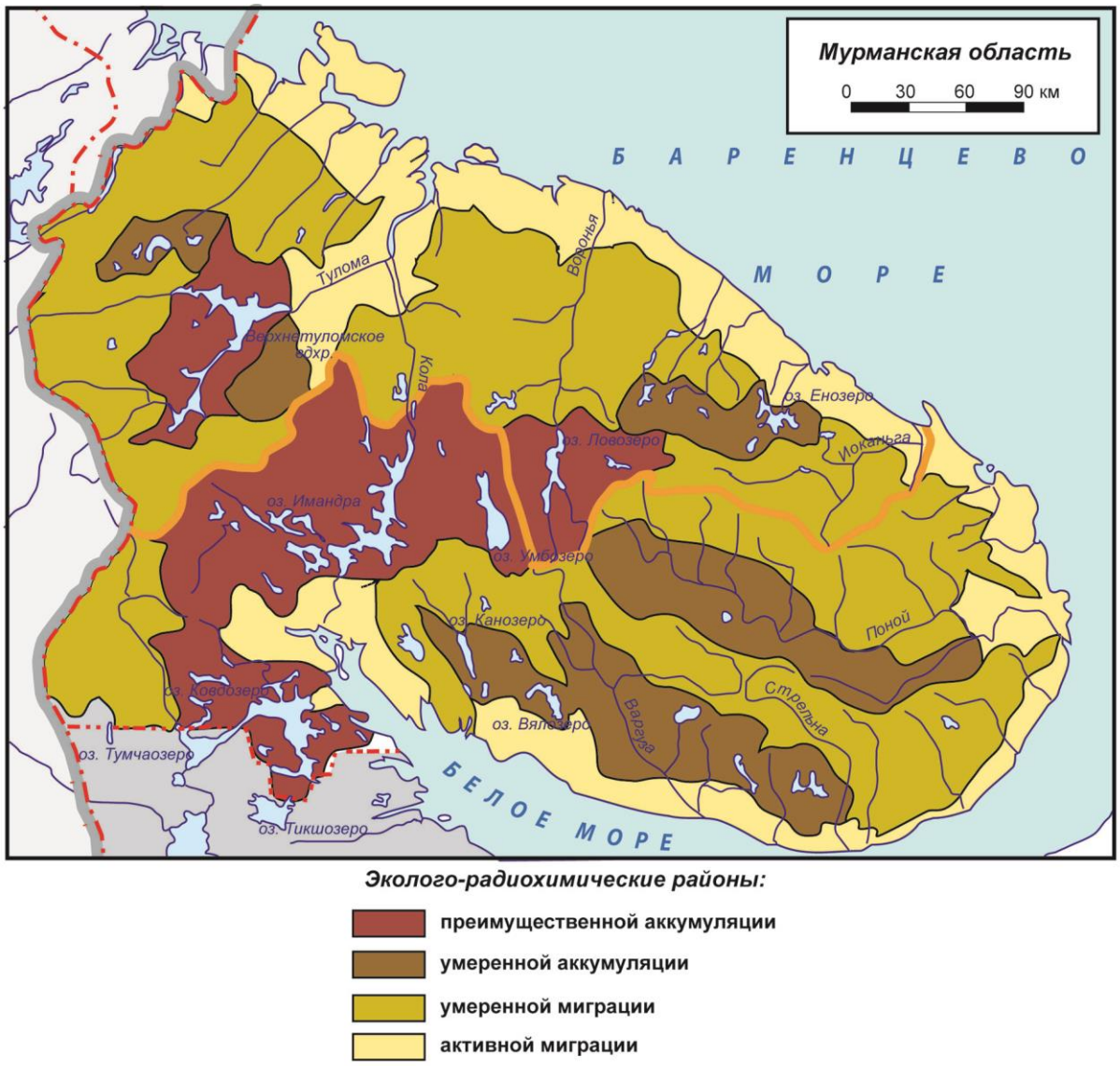



*Рис.2. Эколого-радиохимические районы Мурманской области*

Отметим, что полевые исследования (опробования почв, мхов, лишайников, снега и донных отложений) на отдельных модельных участках Архангельской и Мурманской областей подтвердили интегральную характеристику: максимальные концентрации $Cs^{137}$ были зарегистрированы в районах с интенсивной аккумуляций и в аккумулятивно-транзитных [Борисенко и др., 2007].

В заключение, следует еще раз подчеркнуть, что при проведении эколого-геохимических исследований необходим анализ и синтез различных разномасштабных картографических источников, материалов ландшафтно-геохимических опробований, данных дистанционного зондирования и литературных источников. Такая информация весьма обширна и многопланова, ее обобщение невозможно без использования геоинформационных технологий. В результате исследований разработана и создана специализированная объектно-ориентированная информационно-картографическая база данных о пространственной структуре и свойствах выделенных на территории Мурманской и Архангельской областей эколого-радиохимических районов, являющаяся основой для эколого-радиохимического мониторинга. Созданные геоинформационные слои позволяют выявить закономерности распределения искусственных радионуклидов, попавших на поверхность земли, оценить пути их выноса с изучаемых территорий и спрогнозировать расположение районов их наибольшего накопления. Представленная картографическая база данных может служить основой для создания эколого-радиохимической ГИС, с помощью которой можно контролировать экологическую обстановку в регионе.

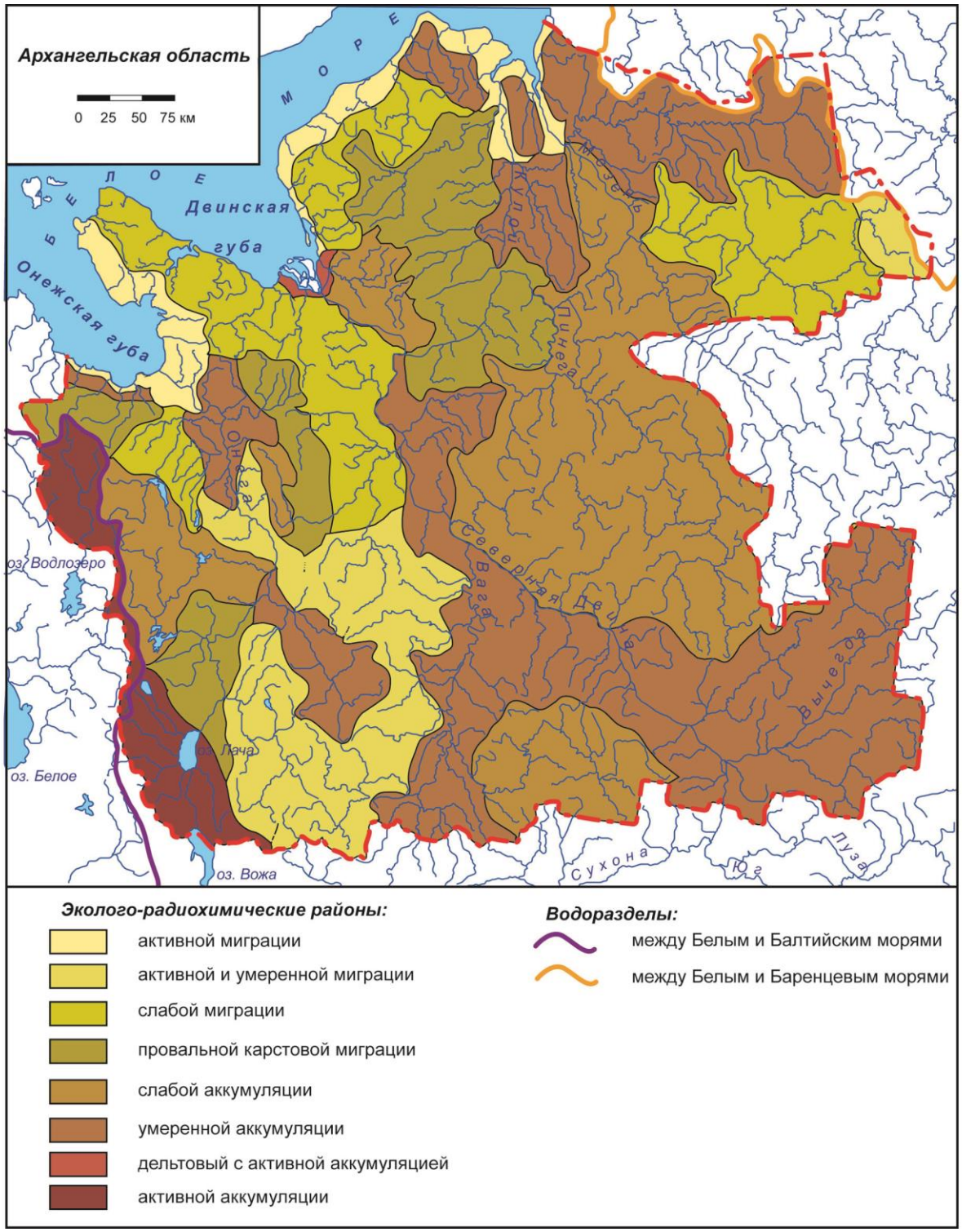



*Рис.3. Эколого-радиохимические районы Архангельской области*

Библиографический список

1. Борисенко Е.Н., Величкин В.И., Воробьева Т.А., Евсеев А.В., Мирошников А.Ю. Эколого-геохимическое районирование севера европейской территории России. // Доклады Академии наук, 2007, том 414, № 5, с. 1-3.
2. Воробьева Т.А., Евсеев А.В., Тульская Н.И. Картографическое обеспечение эколого-радиохимического районирования северных территорий России // Геодезия и картография, №12, 2009, с.40-47.
3. Глазовская М.А. Методические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям: методическое пособие. М.: Изд-во МГУ, 1997, 102 с.
4. Новаковский Б.А., Симонов Ю.Г., Тульская Н.И. Эколого-геоморфологическое картографирование Московской области. М.: Научный мир, 2005. – 72 с.
5. Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки. / В сб. «Эрозия почв и русловые процессы». Вып. 14. под ред. Р.С. Чалова. - М.: Изд-во МГУ, 2003, В. 14, С. 7-32. .