

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОРНИТОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ПАЦИФИКИ (НА ПРИМЕРЕ ОСТРОВОВ ТОПОРКОВА И СТАРИЧКОВА)

И.А. Авессаломова¹, А.Н. Иванов²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии и ландшафтоведения*

¹ *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: aiageo@yandex.ru*

² *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: a.n.ivanov@mail.ru*

Рассмотрены вопросы биогеохимического разнообразия и неоднородности орнитогенных геосистем, сформированных крупными скоплениями морских колониальных птиц. Объектами исследования являлись два острова в Северо-Западной Пацифике с многовековыми птичьими базарами численностью около 100 тыс. птиц – о. Топорков в Командорском архипелаге и о. Старичков вблизи юго-восточного побережья Камчатки. Для выявления их биогеохимической неоднородности составлены специальные схемы, отражающие катенарную структуру островов, соседство и разнообразие элементарных геохимических ландшафтов разных типов и родов, вариабельность травянистой фитомассы в зависимости от видового состава фитоценозов, населения птиц и степени его влияния. В качестве информативных показателей использованы фракционная структура фитомассы и запасы в ней химических элементов, показывающие различные модификации элементарных ландшафтов в условиях орнитогенного прессинга. Установлено, что предпосылки возникновения биогеохимической гетерогенности островов первоначально определяются историей развития и дифференцирующим воздействием абиотических факторов на структуру катен, на которые впоследствии накладывается влияние птиц. Показано, что специфика их воздействия проявляется в разнонаправленной трансформации видового состава фитоценозов, которая корректируется численностью населения птиц и поступлением их метаболитов в почвы, увеличивая неоднородность формирующихся биогеохимических полей. Появление видов-орнитофилов отражается на активности автотрофного биогенеза, емкости фитобарьеров и накоплении на них биогенных элементов (P, Zn, Mn, Cu, Mo, B и др.) в зависимости от филогенетической специализации растений и фракционной структуры травянистой фитомассы. Выявлено, что число элементарных геохимических ландшафтов при одинаковой площади островов может различаться почти в два раза. Возрастанию биогеохимической неоднородности способствует увеличение абсолютной высоты острова, усложнение структуры катен, появление новых типов ландшафтов с разной устойчивостью к орнитогенному воздействию. Локальные контрасты в запасах фитомассы и накоплении химических элементов на внутри-ландшафтном уровне могут различаться на порядок, что определяет своеобразие орнитогенных геосистем, где ведущим фактором структурно-функциональной организации выступают птицы.

Ключевые слова: морские птицы, геохимические ландшафты, катены, разнообразие, биогеохимические параметры, биогеохимическая активность растений

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.10

ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимические аномалии, формируемые морскими колониальными птицами в местах гнездования и прилегающей акватории, достаточно известны в научной литературе [Ellis, 2005; Park et al., 2006; Abakumov et al., 2021; Иванов, Авессаломова, 2012]. В подобных геосистемах, предложенных называться орнитогенными [Иванов, 2013], значительно ускоряется круговорот вещества и энергии относительно фоновых участков Мирового океана, связанный с изъятием птицами большого количества рыбы и беспозвоночных в прилегающей акватории, концентрацией метаболитов птиц в местах гнездования, их трансформацией и выносом в оке-

ан. Орнитогенные геосистемы изымают из природных циклов и закрепляют на биогеохимических барьерах значительное количество C, N, P, K, а также целую группу тяжелых металлов (Zn, Mn, Cu, Mo, Pb, Co, Li, Ti и др.) [Nie et al., 2012; Pérez, 1998; Иванов, Авессаломова, 2008]. Установлены необычные биогеохимические свойства тихоокеанских атоллов тропического пояса с птичьими базарами (значительное увеличение минеральных веществ в растениях, образование атолловых фосфатов и т. п.) [Добровольский, 1998]. В Арктике перенос и аккумуляция морскими птицами биогенного вещества из морских экосистем с высокой продуктивностью в наземные с низкой биомассой формируют не-

обычные орнитогенные геосистемы с повышенной биопродуктивностью и биоразнообразием на обогащенных почвах [Odasz, 1994]. Внесение морского органического вещества в почву птицами частично компенсирует климатически обусловленную низкую продуктивность биоты суши, при этом ландшафты насыщаются не типичными для арктических широт элементами – Ca, Sr, Cd и др. Своеобразие орнитогенных геосистем в Антарктиде заключается в том, что скопления морских птиц здесь связаны главным образом с пингвинами, колонии которых располагаются в основном на плоских поверхностях прибрежных морских террас [Mychra, Tatur, 1991]. Из-за небольшого количества осадков метаболиты птиц накапливаются на поверхности террас, возвращаясь в море в весьма ограниченном количестве [Cockell et al., 2000]. Наряду с закреплением части элементов на биогеохимических барьерах, в орнитогенных геосистемах проявляется и противоположная тенденция – активное включение биогенных элементов в водную миграцию и формирование латеральных потоков, направленных с островов в океан. Происходит увеличение минерализации поверхностных вод и концентрации биогенных элементов по сравнению с фоновыми водотоками, увеличение суммы ионов, хлоридов, сульфатов, содержания щелочных и щелочноземельных элементов, фосфора [Leishman, Wild, 2001].

В большинстве приведенных работ анализируются преимущественно общие геохимические закономерности, определяющие специфику орнитогенных геосистем. Менее изученными являются вопросы биогеохимической неоднородности подобных геосистем, возникающие в процессе их функционирования. Особенности ее формирования можно проследить на разных уровнях, последовательно выделяя геохимические ландшафты (первый уровень) и их катенарную организацию (второй уровень), анализируя их разнообразие, параметры автотрофного биогенеза. Наши исследования показали, что специфика воздействия морских колониальных птиц вследствие их разной экологии, плотности гнездования, разного соотношения зоомеханогенеза и геохимического прессинга способствуют появлению орнитогенных модификаций элементарных геохимических ландшафтов (ЭЛ), ярко выраженной микрокомплексности почвенно-растительного покрова и определяют радиальную и парцеллярную неоднородность элементарных ландшафтов.

Цель работы – выявление особенностей формирования биогеохимической гетерогенности орнитогенных геосистем на примере островов Северо-Западной Пацифики. Решаемые задачи: 1) установление факторов, определяющих общие черты и различия катенарной структуры геохими-

ческих ландшафтов различных островов и особенности распределения населения птиц; 2) выбор биогеохимических параметров, отражающих активность биопродукционного процесса и вовлечения химических элементов в бик; 3) выявление пространственной изменчивости травянистой фитомассы в зависимости от положения ЭЛ в катенах, структуры растительных сообществ и интенсивности орнитогенного прессинга; 4) сопоставление островов по степени биогеохимической гетерогенности орнитогенных геосистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления биогеохимической гетерогенности островных геосистем со скоплениями морских колониальных птиц изучались два острова, один из которых расположен в пределах Командорского архипелага (о. Топорков), а другой – вблизи юго-восточного побережья Камчатки (о. Старичков).

Остров Топорков – низкий и плоский, площадью 0,4 км², представляющий базальтовую экструзию неогенового возраста, расположен в 4 км от о. Беринга. Географические координаты в центральной части острова – 55°12' с. ш. и 165°55' в. д. В рельефе острова выделяется вершинное плато – останец абразионной морской террасы высотой около 9 м, фрагментарно выраженная низкая (2–3 м) морская терраса, валунно-галечниковый пляж и приливная осушка. На большей части острова хорошо выражен береговой уступ высотой до 7 м. На острове существует многовековой птичий базар численностью около 100 тыс. морских колониальных птиц, заселяющих весь остров. В составе населения птиц преимущественно топорки (*Lunda cirrhata*) и серокрылые чайки (*Larus glaucescens*).

Остров Старичков находится в Авачинском заливе в 3 км от побережья Камчатки, сложен вулканогенными породами и имеет форму усеченного конуса с плоской вершиной (147,5 м) и крутыми склонами, отпрепарированными абразией. Географические координаты в центральной части острова – 52°46' с. ш. и 158°36' в. д. Площадь острова также составляет 0,4 км². Численность птиц многовекового птичьего базара орнитологами оценивается по-разному – от 50 тыс. до 180 тыс. особей. Основу их населения составляют старики (*Synthliboramphus antiquus*), топорки (*Lunda cirrhata*), кайры (*Uria aalge*, *U. lomvia*) и чайки (*Larus schistisagus*).

Общим атрибутом структурно-функциональной организации обоих островов является системообразующая роль орнитогенного фактора, действие которого проявляется на фоне природных различий конкретных островов. В совокупности это определяет их сходные черты и своеобразие, отражающие внутреннюю неоднородность геосистем. Полевые

исследования на обоих островах проводились в июле – начале августа в период массового гнездования птиц и активной вегетации растений. Для каждого из них были составлены крупномасштабные ландшафтные карты [Иванов, 2013]. При характеристике внутриландшафтной биогеохимической неоднородности учитывалось наличие элементарных ландшафтов (ЭЛ) определенного типа и разнообразие их вариантов, связанных с изменением растительных сообществ в зависимости от эколого-геохимических условий в разных родах и видах ЭЛ и активности орнитогенного прессинга. В число информативных показателей вошли параметры автотрофного биогенеза и филогенетическая специализация растений, данные о которых получены при геохимическом опробовании. Для выявления биогеохимической неоднородности островов на основании крупномасштабных ландшафтных карт составлены специальные схемы, отражающие соседство и разнообразие ЭЛ разных типов и родов, а также вариабельность травянистой фитомассы (ц/га) в зависимости от видового состава фитоценозов, состава населения птиц и степени его влияния. Степень ее варьирования характеризуется с помощью коэффициентов вариации. Геохимическое опробование растений, почв и донных осадков проводилось по типичным катенам. При определении надземной травянистой фитомассы и ее фракционной структуры использованы данные по укосам с площадок 50×50 см. Определение зольности (сырая зола) выполнено в химической лаборатории кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ, что позволило рассчитать запас минеральных веществ в травяном ярусе различных ЭЛ. Для определения изменчивости зольности отдельных видов рассчитаны коэффициенты вариации. Данные о содержании микроэлементов в золе растений получены в Аналитическом центре Бронницкой геолого-геохимической экспедиции ФГУП ИМГРЭ методом приближенного количественного спектрального анализа (140 проб). Расчеты кларков концентрации микроэлементов (КК) в золе растений проведены относительно литосферы. При расчете биогеохимической активности отдельных видов ($BXA = \sum KК$) использованы КК, полученные для 18 элементов (Zn, Cu, Mn, Ag, Sr, Ba, Mo, B, P и др.). Данные по БХА были использованы при определении филогенетической специализации растений разных систематических групп. С учетом рядов биологического поглощения выбрана группа элементов, на примере которых показано их накопление на фитобарьерах в разных элементарных ландшафтах. В соответствии с предложенными критериями в их число вошли элементы энергичного и сильного биологического накопления (P, Zn, B),

активно поступающие в почвы с продуктами жизнедеятельности морских птиц и различающиеся по интенсивности поглощения растениями.

При систематике ландшафтов использована классификация А.И. Перельмана [Перельман, Касимов, 2000], в которой при определении типов учтены особенности биологического круговорота (БИКа). Своеобразие функционирования орнитогенных геосистем показало также необходимость выделения самостоятельного типа скальных ландшафтов на абразионных береговых уступах, отличающихся низкой фитомассой высших растений при высокой зоомассе населения птиц, что не характерно для наземных ландшафтов. Кроме этого отдельно выделены литоральные ландшафты приподнятого бенча приливно-отливной зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление островов по внутренней гетерогенности орнитогенных геосистем основывается на нескольких положениях. Одно из них предполагает выявление природной основы, определяющей структурно-функциональную организацию геохимических ландшафтов и ее влияние на распределение населения птиц. Другой аспект связан с анализом последствий их воздействия и тенденций изменения биогеохимического разнообразия.

Остров Топорков. Основную часть острова занимают ортоэлювиальные ландшафты высокой абразионной террасы, сложенной базальтами. С некоторой долей условности к неозэлювиальным можно отнести низкие абразионно-аккумулятивные террасы, где маломощные песчано-галечниковые отложения залегают на базальтовом цоколе.

Для монолитных катен высокой террасы характерны неполные малоконтрастные геохимические сопряжения, формирующиеся в условиях слабо выраженного весеннего поверхностного стока при достаточно высоком количестве атмосферных осадков (около 950 мм). По М.А. Глазовской (2002), такой тип сопряжений может рассматриваться как водный почвенно-грунтовой, что сочетается с отсутствием постоянных водотоков и упрощением структуры нижних звеньев катен. В процессе зоогенеза усиливается возможность механической миграции.

Повсеместным распространением пользуются луговые ландшафты (рис. 1), которые характеризуются соседством ЭЛ с разной активностью БИКа (6 вариантов луговых ЭЛ). Это фиксируется по большой контрастности величины надземной травянистой фитомассы (от 16 до 152 ц/га, коэффициент вариации 89,7%) и запаса в ней минеральных веществ (от 0,95 до 15,9 ц/га). Рельеф высокой абразионной террасы, представляющей вершинное плато с очень

крутыми склонами, определил доминирование автономных ЭЛ. По параметрам автотрофного биогеогео неза их можно разделить на две группы. В первую входят ЭЛ с крупнотравными лугами на сухоторфяных подбурах (ЭЛ 3), где отмечается относительно низкая плотность гнездования птиц (чайки). Фитомасса таких лугов достигает 144 ц/га за счет участия

в качестве содоминантов борщевика шерстистого (*Heracleum lanatum*) и дудника Гмелина (*Angelica gmelinii*). По этому показателю крупнотравные луга о. Топорков близки к бореальным крупнотравным лабазниковым лугам (10 т/га) и продуктивнее злаково-крупнотравных лугов (6,6–6,8 т/га) Камчатки [Базилевич, 1981, 1993].

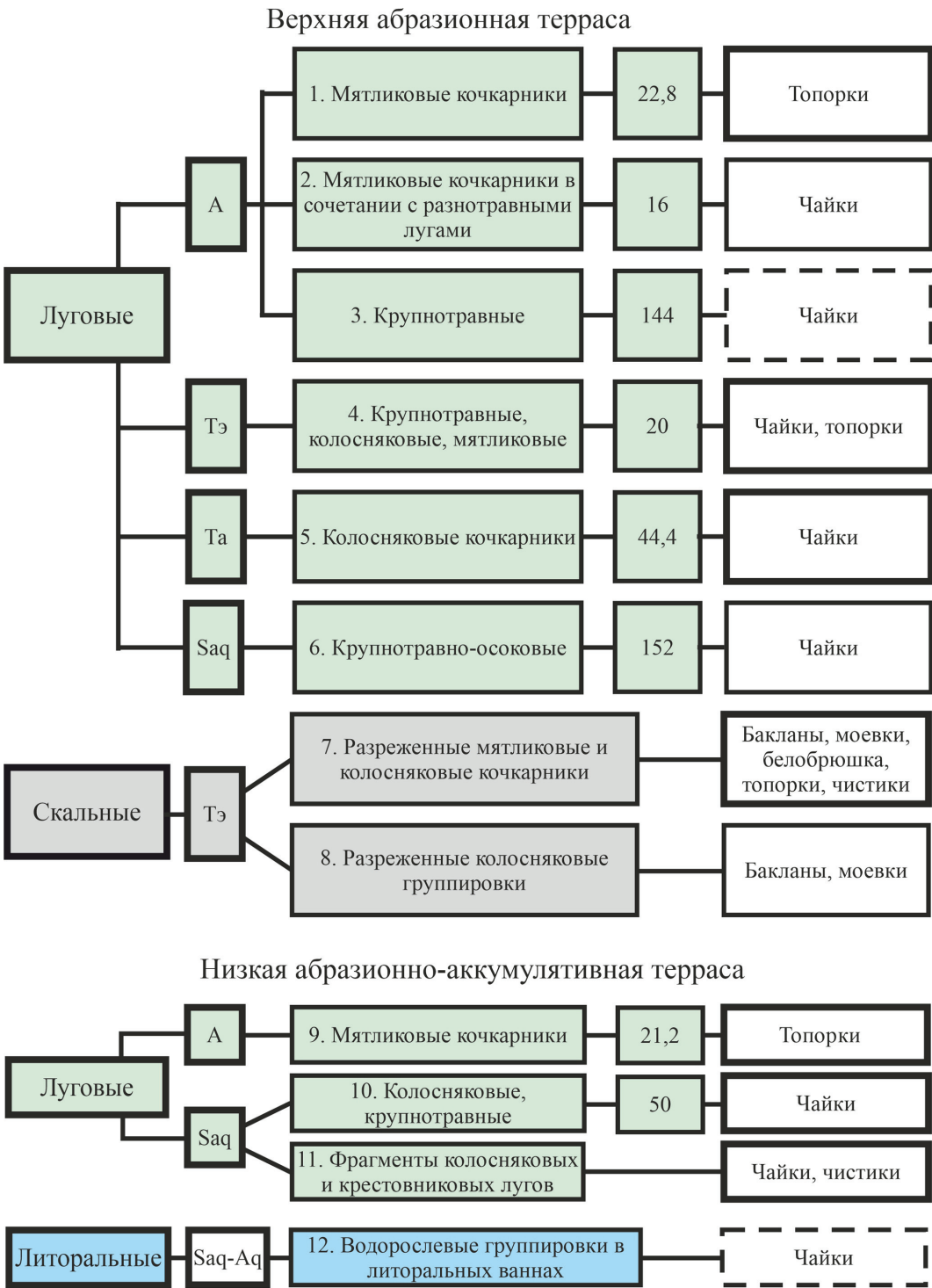


Рис. 1. Структура и биогеохимическая неоднородность катен о. Топорков
Fig. 1. Structure and biogeochemical diversity of catenas of the Toporkov Island

Ко второй группе отнесена большая часть автономных ЭЛ с высокой плотностью гнездования топорков. Это сопровождается появлением злаковых кочкарников с мятликом Татеваки (*Poa tatewakiana*) на сухоторфяных почвах (ЭЛ 1) или их мозаичных сочетаний с разнотравными лугами (ЭЛ 2). В юго-западной части острова высокой плотностью гнездования топорков и чаек отличаются трансэлювиальные ЭЛ пологих склонов, на которых соседствуют фрагменты мятликовых, колосняковых и крупнотравных лугов (ЭЛ 4). В целом автономные и трансэлювиальные ЭЛ в условиях сильного воздействия населения птиц выделяются по снижению активности биопродукционного процесса, что четко фиксируется по уменьшению травянистой фитомассы (16–23 ц/га). По запасу зольных элементов в травяном ярусе (0,9–1,34 ц/га) мятликовые кочкарники резко отличаются от крупнотравных борщевико-дудниковых лугов (15,9 ц/га).

Несмотря на общую тенденцию к снижению значений экстенсивных параметров автотрофного биогеоза при усилении орнитогенного воздействия, большое значение приобретает перестройка растительных сообществ и появление видов с разной способностью к накоплению минеральных веществ. На о. Топорков большая часть видов относится к орнитофилам, среди которых повышенной зольностью отличаются представители крупнотравья по сравнению со злаками. Так, у мятлика Татеваки зольность составляет в среднем 4,8%, у колосняка мягкого (*Leymus mollis*) – 6,8%, а у дудника Гмелина – 11%.

Подчиненные ЭЛ встречаются редко и связаны со слабовыраженными пологосклонными понижениями, куда возможен привнос биогенных элементов из верхних звеньев катен. К ним относятся трансаккумулятивные ЭЛ с колосняковыми кочкарниками (ЭЛ 5), заселенные чайками. Появление среди кочек дудника и борщевика сопровождается усложнением фракционной структуры и увеличением травянистой фитомассы (44,4 ц/га), несмотря на угнетенное состояние этих видов. Одно из слабо выраженных понижений выделяется по увеличению гидроморфности, появлению крупнотравно-осоковых лугов на торфяно-перегнойно-глеевых почвах. Такие комплексы (ЭЛ 6) отнесены к слабоподчиненным супераквальным, возникновение которых, возможно, связано с утяжелением гранулометрического состава субстрата и бронирующей ролью базальтовой плиты, способствующих застою талых и почвенных вод. Это вызывает усиление детритогенеза и снижение содержания Fe в оглеенных горизонтах. Для этих лугов характерно высокое проективное покрытие (до 70%), максимальная для о. Топорков травянистая фитомасса (152 ц/га), основную часть которой составляет осока скрытоплодная (*Carex*

cryptocarpa). Несмотря на значительный вклад во фракционную структуру фитомассы (120 ц/га), невысокая зольность этого вида (6,5%) снижает общий запас минеральных веществ в травяном ярусе крупнотравно-осоковых лугов (11,4 ц/га) по сравнению с крупнотравными.

При сопоставлении разных вариантов луговых ЭЛ их разнообразие выделяется не только по экстенсивным параметрам биогенной миграции, но и по интенсивности включения элементов в БИК. Она корректируется в зависимости от флористического состава фитоценозов и филогенетической специализации входящих в них растений. В целом биогеохимическая активность крупнотравных видов (у дудника БХА = 82) выше по сравнению со злаками и осоками (БХА от 47 до 58), у которых ее уменьшение происходит в первую очередь за счет снижения способности к накоплению В, что характерно для растений этих систематических групп. У мятлика Татеваки, колосняка мягкого и осоки скрытоплодной активность биопоглощения этого элемента (КК от 8,5 до 9,3) на порядок ниже, чем у дудника (КК до 50 и более). Менее активно они накапливают Sr (КК 0,4–0,8), переходящий в рядах биологического поглощения в группу элементов захвата, а также Ва, который часто вообще не обнаружен. В то же время все растения, в том числе злаки, энергично накапливают Zn (КК от 18 до 23), что связано с орнитогенным привносом этого элемента в местах активного гнездования птиц и было отмечено для других островов Северной Пацифики [Иванов, 2013]. Сходная тенденция характерна и для Р.

Изменение соотношения между видами отражается на структуре парогенных ассоциаций элементов, накапливающихся в различных фракциях фитомассы, что усиливает различия сопряженных ЭЛ. Одним из их проявлений является емкость фитобарьеров травяного яруса, которая определяется с учетом активности продуцирования фитомассы, запаса минеральных веществ и накопления элементов, выполняющих важные физиологические функции (табл. 1). Наибольшей емкостью отличаются фитобарьеры крупнотравных лугов автономных ЭЛ (ЭЛ 3), в которых высокая продукция дудника и борщевика сочетается с их повышенной зольностью и активным поглощением Р, Zn и В. В нижних звеньях катен на крупнотравно-осоковых лугах супераквальных ЭЛ (ЭЛ 6) основной вклад в создание фитомассы вносят осоки, которые несмотря на пониженную зольность обеспечивают свою ведущую роль в создании общего запаса минеральных веществ, Р и Zn, но уступают крупнотравью в накоплении В. Снижение емкости фитобарьера зафиксировано в мятликовых (ЭЛ 1) и колосняковых (ЭЛ 5) кочкарниках, когда при низкой продукции и зольности злаков за счет синергических

эффектов резко снижается запас зольных элементов в фитоярусе, особенно В. Основную роль в накоплении В на фитобарьере в колосняковых кочкарниках трансаккумулятивных ЭЛ играют представители крупнотравья.

Сопоставление луговых ЭЛ по комплексу параметров, отражающих разнообразные изменения их барьерных функций, подчеркивает биогеохимическую неоднородность высокой абразионной террасы. Она проявляется даже во внутрифациальном пространстве, когда при активном воздействии

населения птиц появление микрокомплексности почвенно-растительного покрова сопровождается вариабельностью биогеохимических параметров растений определенного вида. Например, наблюдается значительное варьирование в колосняковых кочкарниках зольности этого доминанта (коэффициент вариации C_v более 50%) и степени концентрации Zn (КК от 9 до 36), что позволяет говорить о прямом или косвенном влиянии орнитогенного фактора на биологическое поглощение элементов растениями.

Таблица 1

Накопление элементов на фитобарьере луговых ландшафтов о. Топорков

Фракционная структура травяни- стой фитомассы	Фитомасса / запас золь- ных элементов, ц/га	Накопление элементов в травяном ярусе, кг/га					
		P		Zn		B	
		Фракция	Всего	Фракция	Всего	Фракция	Всего
Крупнотравные луга (ЭЛ 3)							
Крупнотравье	144/15,9	50	50	3	3	0,8	0,8
Мятликовые кочкарники (ЭЛ 1)							
Злаки	23/1,1	3	3	0,2	0,2	0,01	0,01
Колосняковые кочкарники (ЭЛ 5)							
Злаки	32,4/1,3	4	8	0,3	0,6	0,01	0,08
Крупнотравье	12/1,3	4		0,3		0,07	
Крупнотравно-осоковые луга (ЭЛ 6)							
Осоки	120/7,9	20	30	2	3	0,1	0,3
Крупнотравье	32/3,5	10		1		0,2	

Для крутых склонов высокой террасы наряду с луговыми ЭЛ характерно наличие скальных комплексов, где при высоком орнитогенном прессинге увеличивается разнообразие населения птиц (бакланы, моевки, белобрюшки, топорки, чистики). Это сопровождается сохранением отдельных фрагментов разреженных мятликовых и колосняковых кочкарников (ЭЛ 7), а при увеличении влияния птиц появлением несформированных колосняковых группировок (ЭЛ 8).

Низкая (2–3 м) абразионно-аккумулятивная терраса развита фрагментарно, отличается более простой структурой при доминировании луговых ландшафтов (три варианта ЭЛ). Автономные ЭЛ активно используются для гнездования топорками и заняты мятликовыми кочкарниками на каменистых маломощных сухоторфяных почвах (ЭЛ 9). Они отличаются невысокой фитомассой (21,2 ц/га) и низким запасом минеральных веществ (1 ц/га). К супераквальным комплексам, заселенным чайками, отнесены валунно-галечные с ракушечником пляжи; их тыловые части заняты крупнотравными и крупнотравно-колосняковыми лугами (ЭЛ 10), в которых

присутствие продуктивных и высокозольных видов из разнотравья обеспечивает увеличение фитомассы (50 ц/га) и запас минеральных веществ (5,5 ц/га). Другой вариант супераквальных ЭЛ связан с маршами, на которых валунно-галечные отложения прерываются выходами коренных пород. Эти комплексы отличаются фрагментарным развитием колосняковых и крестовниковых сообществ (ЭЛ 11), флористическое своеобразие которых определяется появлением таких видов, как вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*) и крестовник ложноарниковый (*Senecio pseudoarnica*). Особое место занимают литоральные субаквально-аквальные комплексы приподнятого бенча (ЭЛ 12), где во время отливов в литоральных ваннах сохраняются водорослевые группировки.

В целом, сопоставление природных комплексов о. Топорков показывает, что несмотря на низкую абсолютную высоту, небольшие размеры и господство однотипных луговых ландшафтов, отчетливо проявляется биогеохимическая гетерогенность формирующихся здесь орнитогенных геосистем, обусловленная совместным действием комплекса факторов, определяющих структурно-генетические

особенности острова и трансформацию растительных сообществ в разных родах ЭЛ в зависимости от орнитогенного воздействия.

Остров Старичков. Геохимические ландшафты острова также относятся к ортоэлювиальным и связаны с интрузией андезитов и базальтов миоценового возраста. Катенарная организация отличается концентрическим строением, что обусловлено расположением автономных ЭЛ в пределах центральной части вершинного плато, окаймленного трансэлювиальными ЭЛ крутых склонов. Их пространственная гетерогенность усиливается, во-первых, за счет избирательной денудации и образования скалистых базальтовых гребней и мысов, ориентированных в соответствии с направлениями тектонических разломов. Во-вторых, увеличение неоднородности связано с деятельностью эрозионных процессов и распространением вытянутых долинообразных понижений, с которыми связано появление трансаккумулятивных ЭЛ и временных ручьев снегово-дождевого питания. Такое сочетание автономных, трансэлювиальных и трансаккумулятивных ЭЛ определяет линейно-радиальный рисунок островной геосистемы. В береговой зоне преобладание абразии над аккумуляцией ограничивает формирование валунно-галечных пляжей, роль которых в усложнении катенарной структуры невелика.

При одинаковой площади (0,4 км²) о. Старичков резко отличается от о. Топорков значительно большей абсолютной высотой (147,5 м). Роль орографического фактора в вертикальной дифференциации растительного покрова способствует увеличению биогеохимической неоднородности островной геосистемы в связи с соседством ландшафтов с разным типом БИКа – луговых и стланиковых (рис. 2). Ольховые стланики (три варианта ЭЛ) приурочены к краевой части плато и верхним частям крутых склонов. Стланик образует полукольцо, включающее автономные (ЭЛ 1) и сопряженные с ними трансэлювиальные комплексы (ЭЛ 2) склонов северной экспозиции, освоенные чайками и топорками. На склонах куртины ольхового стланика образуют мозаичные сочетания с вейниково-крупнотравными лугами (ЭЛ 4) или крупнотравно-полыниевыми вейниковыми кочкарниками (ЭЛ 5). Кустарниковые ивняки (ЭЛ 3) встречаются в автономных позициях на северо-западе вершинного плато и мало подвергаются воздействию птиц.

Наиболее широко на о. Старичков распространены луговые сообщества (12 вариантов луговых ЭЛ), различающиеся по интенсивности орнитогенного пресса, флористическому составу фитоценозов и надземной травянистой фитомассе. Она составляет 184–392 ц/га и более, что гораздо выше по сравнению с продуктивностью лугов о. Топорков и сопо-

ставимо с данными по высокотравным лугам южно-таежной подзоны Притихоокеанского региона [Базилевич, 1993]. Вместе с тем контрастность распределения надземной травянистой фитомассы на о. Старичков несколько ниже, чем на о. Топорков, хотя остается достаточно высокой (коэффициент вариации 54,3%).

Для заселенных чайками автономных ландшафтов Н-класса на выровненной поверхности плато характерны вейниковые (ЭЛ 6) и крупнотравно-вейниковые (ЭЛ 7) луга на своеобразных вулканорнитогенных гумусово-аккумулятивных почвах, отличающихся наличием прослоев пепла и погребенных гумусовых горизонтов. Надземная фитомасса вейниковых лугов достигает 195 ц/га, ее основную часть составляет вейник Лангсдорфа (высота 1,2–1,5 м). На крупнотравно-вейниковых лугах наблюдается некоторое увеличение фитомассы (200 ц/га) и усложнение фракционной структуры за счет появления в составе фитоценозов крапивы плосколистной (*Urtica platyphylla*), шеломайника (*Filipendula camschatica*), полыни пышной (*Artemisia opulenta*), которые не играли заметной роли на лугах о. Топорков.

Высокой биогеохимической неоднородностью отличаются трансэлювиальные комплексы склонов (луговые ЭЛ 8–14), где, несмотря на усиление орнитогенного пресса, зафиксировано увеличение активности биопродукционного процесса и рост фитомассы до 200–400 ц/га и более. Ее вариабельность связана с изменением доминантов травяного яруса (луга вейниково-полыниевые, вейниково-крупнотравные, крупнотравно-полыниевые-колосняковые и др.) на склонах разной экспозиции и крутизны, разнообразием птичьего населения, увеличением доли орнитофильного крупнотравья во фракционной структуре фитомассы. Например, в средних частях западных склонов с крупнотравно-вейниковыми лугами (ЭЛ 12), где гнездятся чайки и топорки, роль злаков в формировании фитомассы (100 ц/га) ниже относительно крупнотравья (304 ц/га), представленного борщевиком шерстистым, дудником Гмелина, шеломайником, полыню пышной и крапивой плосколистной. Сходные данные (257–294 ц/га) были получены по надземной фитомассе основных доминантов крупнотравных лугов Сахалина [Морозов, 1978]. Повышенная зольность этих видов (полынь – 15%, борщевик – 18%, крапива – 19%) в отличие от вейника (8%) увеличивает их вклад в общий запас минеральных веществ в фитоярусе. Нижние части склонов с вейниково-колосняковыми кочкарниками с участием полыни пышной (ЭЛ 14) и гнездовьями стариков отличаются меньшей фитомассой (184,4 ц/га). В ее составе доля злаков (107 ц/га) выше крупнотравья (77 ц/га), хотя при высокой зольности полыни уча-

ствие этой фракции при формировании запаса минеральных веществ в 1,2 раза выше, чем злаков.

Увеличение активности накопления минеральных веществ и высокая вариабельность зольности (коэффициент вариации C_v до 48%) у орнитофильных видов крупнотравья могут быть связаны с изменением трофности местообитаний при различной плотности населения птиц, а также в связи с

возможностью внекорневого поглощения элементов при импультверизации или разбрызгивании метаболитов птицами. Различия филогенетической специализации злаков и крупнотравья отражаются и на типе химизма отдельных фракций фитомассы, в частности азотно-калиевого при доминировании шеломайника, азотно-кремниевого для фитомассы вейника [Степанова и др., 1981].

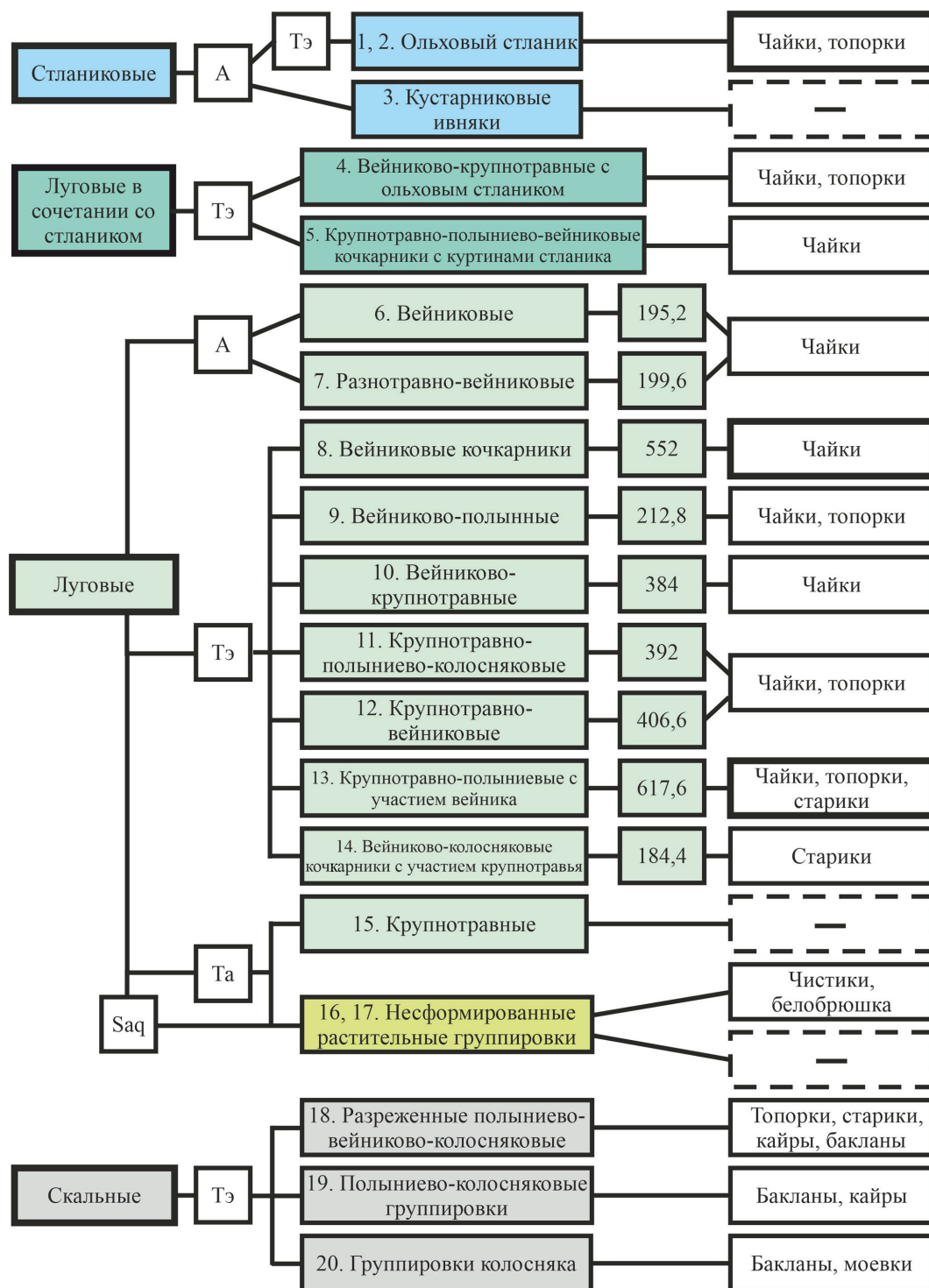


Рис. 2. Структура и биогеохимическая неоднородность катен о. Старичков

Fig. 2. Structure and biogeochemical diversity of catenas of the Starichkov Island

Представители орнитофильного крупнотравья о. Старичков проявляют высокую биогеохимическую активность к накоплению микроэлементов (БХА у полыни пышной – 82, борщевика шерстистого – 98, крапивы плосколистной – 100), в первую очередь В, Zn и Ag (КК более 10), а также Sr (КК до 8). Видовая специализация проявляется в более активном поглощении Sr, Ba, Mn, Mo крапивой, Cu – полынью и борщевиком. Среди злаков по увеличению БХА выделяется вейник Лангсдорфа (БХА = 65,6), у которого кроме Zn в рядах

биологического поглощения к элементам энергичного накопления часто относится В, что ранее было отмечено для этого вида и на о. Матыкиль [Иванов, Авессаломова, 2008]. По сравнению с мятликом Татеваки и колосняком мягким, вейник энергичнее захватывает не только В, но и Mn и Sr. Эти различия сопровождаются изменением элементного состава фитомассы в зависимости от соотношения доминантов, что усиливает биоразнообразие лугов и связанных с ними фитобарьеров (табл. 2).

Таблица 2

Накопление элементов на фитобарьере луговых ландшафтов о. Старичков

Фракционная структура травянистой фитомассы	Фитомасса / запас зольных элементов, ц/га	Накопление элементов в травяном ярусе, кг/га					
		Р		Zn		В	
		Фракция	Всего	Фракция	Всего	Фракция	Всего
Вейниковые луга (ЭЛ 6)							
Злаки	195,2/17,8	53	53	4	4	0,4	0,4
Вейниково-крупнотравные луга (ЭЛ 9)							
Злаки	40,8/3,7	10	110	0,7	5,7	0,07	2,07
Крупнотравье	172/33,5	100		5		2	

В монодоминантных вейниковых лугах на плато о. Старичков (ЭЛ 6), заселенных чайками, емкость фитобарьеров обеспечивается за счет их большой фитомассы и запаса зольных элементов, в том числе важных биогенов (Р, Zn, В и др.). Их аккумуляция в органогенных горизонтах, усиленная поступлением метаболитов птиц, способствует увеличению трофности местообитаний, что согласуется с хорошей обеспеченностью почв Р. По более высокому уровню накопления в фитоярусе Р, Zn и В вейниковые луга резко отличаются от мятликовых кочкарников о. Топорков, активно используемых топорками, и близки к крупнотравным лугам этого острова.

Емкость фитобарьеров в автономных и транзитивных ЭЛ обусловлена появлением крупнотравья и увеличением запаса элементов в связи с проявлением синергических эффектов при активном продуцировании фитомассы с высокой зольностью. Наибольшие различия проявляются в накоплении в травяном покрове В, которое на порядок выше, чем на вейниковых лугах (соответственно 2,1 и 0,4 кг/га). Такая тенденция проявляется даже в тех случаях, когда их фитомасса выше по сравнению с фракцией разнотравья в вейниково-крупнотравных лугах. Снижение емкости фитобарьеров характерно для скальных ландшафтов с разреженными полыниково-вейниково-колосняковыми (ЭЛ 18) и полыниково-колосняковыми (ЭЛ 19) группировками, к которым приурочены колонии бакланов, кайр и мое-

вок. Фрагментарное развитие лугов в узких днищах каньонообразных долин с временными водотоками не способствует появлению емких фитобарьеров в гетерономных звеньях катен.

В целом биогеохимическая неоднородность о. Старичков определяется комплексом биотических и абиотических факторов. С ними связано изменение состава населения птиц на склонах разного гипсометрического уровня и экспозиции, различная активность механической миграции при зоогенезе, изменение биопродукционного процесса в зависимости от структурно-функциональных особенностей фитоценозов и их сукцессионных смен. Увеличению биогеохимической неоднородности о. Старичков способствует большая абсолютная высота, а также соседство стланиковых и луговых ландшафтов и их сочетаний, что отличает его от о. Топорков с луговыми ландшафтами.

ВЫВОДЫ

Предпосылки возникновения биогеохимической гетерогенности островов первоначально определяются историей развития и дифференцирующим воздействием абиотических факторов. Влияние орографического фактора способствует усложнению внутренней неоднородности о. Старичков в связи с развитием ортоэлювиальных ландшафтов с разным типом БИКа (луговые и стланиковые). Низкий о. Топорков занят однотипными луговыми

ландшафтами, однако увеличение его гетерогенности обусловлено изменениями морфолитогенной основы в связи с соседством орто- и неозювиальных ландшафтов (появление разных родов и видов). Такие различия оказывают влияние на катенарную структуру островов, на фоне которой проявляется действие орнитогенного фактора. Площадь острова, выступающая важнейшим фактором организации геосистем в островной биогеографии и островном ландшафтоведении, не всегда имеет решающее значение для орнитогенных геосистем, что подтверждает разная степень биогеохимической неоднородности одинаковых по площади островов.

Одним из показателей степени биогеохимической неоднородности орнитогенных геосистем является разнообразие вариантов ЭЛ и их модификаций, различающихся по структуре и продуктивности фитоценозов в условиях орнитогенного прессинга. Увеличение разнородности о. Старичков (20 вариантов ЭЛ) обусловлено сочетанием лугов и стлаников, разнообразием трансэлювиальных ЭЛ с разной степенью изменения видового состава и биогеохимических параметров в зависимости от влияния птиц. Большая однородность низкого о. Топорков (12 вариантов ЭЛ) связана с упрощением структуры катен несмотря на сохранение тенденции к изменению фитоценозов на разных стадиях орнитогенных сукцессий.

Высокая вариабельность фитомассы луговых ландшафтов обусловлена разнонаправленной трансформацией фитоценозов под влиянием орнитогенного фактора, которая может способствовать как увеличению, так и снижению биопродукции. На о. Топорков в верхних звеньях катен активность

автотрофного биогенеза возрастает на крупнотравных лугах с низкой плотностью гнездования чаек и снижается при уменьшении флористического богатства и появлении мятликовых кочкарников при высокой плотности птичьего населения. Несмотря на орнитогенный прессинг, в нижних звеньях катен рост фитомассы обусловлен дополнительным поступлением биогенов с латеральными потоками. Луга о. Старичков отличаются по резкому увеличению фитомассы за счет разнообразия орнитофильного крупнотравья и появления вейника Лангсдорфа. Видовой состав фитоценозов корректируется численностью населения птиц и поступлением их метаболитов в почвы, увеличивая неоднородность формирующихся биогеохимических полей.

Филогенетическая специализация доминантов и их роль во фракционной структуре фитомассы определяют запас зольных элементов и емкость радиальных и латеральных барьеров в разных частях катен. По сравнению со злаками, крупнотравные виды отличаются повышенной зольностью и биогеохимической активностью, накоплением P, Zn, B. На о. Топорков высокой емкостью отличаются радиальные фитобарьеры в травяном ярусе крупнотравных лугов автономных ЭЛ и латеральные барьеры в трансаккумулятивных и супераккумулятивных ЭЛ. Для о. Старичков фрагментарное развитие лугов по ложбинам не способствует появлению латеральных барьеров в гетерономных звеньях катен. Совместное использование экстенсивных и интенсивных параметров биогенной миграции и различия их сочетаний более точно отражают биогеохимическую гетерогенность, общие черты и различия островных орнитогенных геосистем.

Благодарность. Работа выполнена в рамках госзадания «Факторы и процессы пространственно-временной организации природных и антропогенных ландшафтов» (номер ЦИТИС: 121051300176-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Базилевич Н.И. Продуктивность, энергетика и биогеохимия наземных экосистем Тихоокеанского кольца // Вопросы географии. Сб. 117. Геофизика ландшафта. 1981. С. 146–208.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
- Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
- Иванов А.Н. Орнитогенные геосистемы островов Северной Пацифики. М.: Научный мир, 2013. 228 с.
- Иванов А.Н., Авессаломова И.А. Орнитогенные экосистемы – геохимические феномены биосферы // Биосфера. 2012. Т. 4. № 4. С. 385–396.
- Иванов А.Н., Авессаломова И.А. Ландшафтно-геохимические особенности орнитогенных геосистем Японских островов (Охотское море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 2. С. 35–42.
- Морозов В.Л. Запасы надземной и подземной фитомассы крупнотравья и его доминантов на Сахалине // Ботанический журнал. 1978. Т. 63. № 3. С. 381–387.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 762 с.
- Степанова К.Д., Белая Г.А., Качура Н.Н. и др. Биологическая продуктивность луговых сообществ Дальнего Востока (приокеанические районы). М.: Наука, 1981. 298 с.
- Abakumov E.V., Parnikova I.Yu., Zhiyanski M. et al. Ornithogenic factor of soil formation in Antarctica: a review, *Eurasian soil science*, 2021, no. 4, p. 528–540, DOI: 10.1134/S1064229321040025/.

- Cockell C.S., Stokes M.D., Korsmeyer K.E. Overwintering strategies of Antarctic Organisms 694, *Environ. Rev.*, 2000, no. 8, p. 1–19, DOI: 10.1139/a00-001.
- Ellis J.C. Marine birds on land: a review of plant biomass, species richness and community composition in seabird colonies, *Plant Ecology*, 2005, vol. 181, p. 227–241.
- Leishman M.R., Wild C. Vegetation abundance and diversity in relation to soil nutrients and soil water content in Vestfold Hills, East Antarctica, *Antarct. Science*, 2001, no. 13, p. 126–134, DOI: 10.1017/S0954102001000207.
- Mychra A., Tatur A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic, *Polar Res.*, 1991, vol. 12, p. 3–24.
- Nie Y., Liu X., Sun L., Emslie S.D. Effect of penguin and seal excrement on mercury distribution in sediments from the Ross Sea region, East Antarctica, *Science of the Total Environment*, 2012, no. 433, p. 132–140, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.022.
- Odasz A.M. Nitrate Reductase Activity in Vegetation below an Arctic Bird Cliff, Svalbard, Norway, *Journal of Vegetation Science*, vol. 5, no. 6, p. 913–920.
- Pérez O.X.L. Effects of nesting yellow-legged gulls (*Larus cachinnans* Pallas) on the heavy Metal Content of Soils in the Cies Islands (Galicia, North-west Spain), *Marine Pollution Bulletin*, 1998, vol. 36, iss. 4, p. 267–272.
- Park J.-H., Day T., Ruhland C.T. Biogeochemical pools and fluxes of carbon and nitrogen in a maritime tundra near penguin colonies along the Antarctic Peninsula, *Polar Biology*, 2006, no. 30, p. 199–207, DOI: 10.1007/s00300-006-0173-y.

Поступила в редакцию 14.02.2022

После доработки 21.10.2022

Принята к публикации 01.12.2022

BIOGEOCHEMISTRY OF ORNITHOGENIC GEOSYSTEMS OF THE NORTHWESTERN PACIFIC (CASE STUDY OF THE TOPORKOV AND STARICHKOV ISLANDS)

I.A. Avessalomova¹, A.N. Ivanov²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science*

¹ *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: aiageo@yandex.ru*

² *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: a.n.ivanov@mail.ru*

The paper focuses on the biogeochemical diversity and heterogeneity of ornithogenic geosystems formed by large colonies of sea birds. The objects of the study were two islands in the Northwest Pacific with centuries-old bird bazaars of about 100,000 birds, i. e. Toporkov Island in the Commander Archipelago and Starichkov Island near the southeast coast of Kamchatka. To identify their biogeochemical heterogeneity, special schemes reflecting the catenary structure of the islands, the neighborhood and diversity of elementary geochemical landscapes of different types and genera, the variability of herbaceous phytomass depending on the species composition of phytocenoses, the bird population and the degree of its influence were compiled. The fractional structure of phytomass and the stocks of chemical elements in it showing various modifications of elementary landscapes under the ornithogenic pressures were used as informative indicators. It was found that the biogeochemical heterogeneity of the islands is initially preconditioned by the history of their evolution and the differentiating influence of abiotic factors on the structure of catenas, which were subsequently overlaid by the influence of birds. It is shown that specific impact of the bird population results in the multidirectional transformation of the species composition of phytocenoses, which is modified by the bird numbers and the inflow of their metabolites into the soil, increasing the heterogeneity of resulting biogeochemical fields. The ornithophile species change the activity of autotrophic biogenesis, the capacity of phytobarrriers and the accumulation of biogenic elements (P, Zn, B) on them depending on the phylogenetic specialization of plants and the fractional structure of herbaceous phytomass. It was revealed that the number of elementary geochemical landscapes could differ almost twice within the same area of islands. The increase in biogeochemical heterogeneity is promoted by increasing absolute height of the island, the complexity of the structure of catenas, and formation of new types of landscapes with different resistance to ornithogenic effects. Local contrasts in phytomass reserves and chemical element accumulation at the intra-landscape level may differ by an order of magnitude. This determines the specificity of ornithogenic geosystems, where birds are the leading factor of structural and functional organization.

Keywords: sea birds, geochemical landscapes, catenas, diversity, biogeochemical parameters, biogeochemical activity of plants

Acknowledgements. The study was carried out under the state task “Factors and processes of spatial-temporal organization of natural and anthropogenic landscapes” (no. 121051300176-1).

REFERENCES

- Abakumov E.V., Parnikoza I.Yu., Zhiyanski M. et al. Ornithogenic factor of soil formation in Antarctica: a review, *Eurasian soil science*, 2021, no. 4, p. 528–540, DOI: 10.1134/S1064229321040025/.
- Bazilevich N.I. [Productivity, energetics and biochemistry of land of the Pacific circle], *Voprosy geografii, sb. 117, Geofizika landshafta* [Problems of geography, col. 117, Landscape geophysics], 1981, no. 117, p. 146–208. (In Russian)
- Bazilevich N.I. *Biologicheskaya produktivnost' Severnoi Evrazii* [Biological productivity of Northern Eurasia], Moscow, Nauka Publ., 1993, 293 p. (In Russian)
- Cockell C.S., Stokes M.D., Korsmeyer K.E. Overwintering strategies of Antarctic Organisms 694, *Environ. Rev.*, 2000, № 8, p. 1–19, DOI: 10.1139/a00-001.
- Dobrovol'skii V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of biogeochemistry], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998, 413 p. (In Russian)
- Ellis J.C. Marine birds on land: a review of plant biomass, species richness and community composition in seabird colonies, *Plant Ecology*, 2005, vol. 181, p. 227–241.
- Glazovskaya M.A. *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniy prirodnikh landshaftov* [Geochemical foundations of typology and methods for studying natural landscapes], Smolensk, Oikumena Publ., 2002, 288 p. (In Russian)
- Ivanov A.N. *Ornitogennye geosistemy ostrovov Severnoi Patsifiki* [Ornithogenic geosystems of the islands of North Pacific], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2013, 228 p. (In Russian).
- Ivanov A.N., Avessalomova I.A. Landshaftno-geokhimicheskie osobennosti ornitogennykh geosistem Jamskih ostrovov (Ohotskoe more) [Landscape-geochemical features of ornithogenic geosystems of the Yamskie Islands (the Sea of Okhotsk)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2008, no. 2, p. 35–42. (In Russian)
- Ivanov A.N., Avessalomova I.A. Ornitogennye ekosistemy – geokhimicheskie fenomeny biosfery [Ornithogenic ecosystems as geochemical phenomena of the biosphere], *Biosfera*, 2012, no. 4, p. 385–396. (In Russian)
- Leishman M.R., Wild C. Vegetation abundance and diversity in relation to soil nutrients and soil water content in Vestfold Hills, east Antarctica, *Antarct. Science*, 2001, № 13, p. 126–134, DOI: 10.1017/S0954102001000207.
- Morozov V.L. Zapasy nadzemnoi i podzemnoi fitomassy krupnotrav'ya i ego dominantov na Sakhaline [Stocks of above-ground and underground phytomass of tall herbs and its dominants in Sakhalin], *Botanicheskii zhurnal*, 1978, vol. 63, no. 3, p. 381–387. (In Russian)
- Nie Y., Liu X., Sun L., Emslie S.D. Effect of penguin and seal excrement on mercury distribution in sediments from the Ross Sea region, East Antarctica, *Science of the Total Environment*, 2012, № 433, p. 132–140, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.022.
- Park J.-H., Day T., Ruhland C.T. Biogeochemical pools and fluxes of carbon and nitrogen in a maritime tundra near penguin colonies along the Antarctic Peninsula, *Polar Biology*, 2006, № 30, p. 199–207, DOI: 10.1007/s00300-006-0173-y.
- Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape Geochemistry], Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999, 768 p. (In Russian)
- Pérez O.X.L. Effects of nesting yellow-legged gulls (*Larus cachinnans* Pallas) on the heavy Metal Content of Soils in the cies Islands (Galicia, North-west Spain), *Marine Pollution Bulletin*, 1998, vol. 36, iss. 4, p. 267–272.
- Stepanova K.D., Belaja G.A., Kachura N.N. et al. *Biologicheskaya produktivnost' lugovykh soobshchestv Dal'nego Vostoka (priokeanicheskie rajony)* [Biological productivity of meadow communities of the Far East (near-ocean areas)], Moscow, Nauka Publ., 1981, 228 p. (In Russian)

Received 14.02.2022

Revised 21.10.2022

Accepted 01.12.2022