

УДК 502.75:574.47: 581.5

Эколого-геологические системы тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр (Якутия)

Королёв В. А., Балыкова С. Д.

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия
va-korolev@bk.ru, sbalykova@yandex.ru*

В настоящей статье, основанной на результатах собственных полевых исследований в Центральной Якутии и опубликованных данных, рассмотрены особенности эколого-геологических систем тукуланов на примере двух схожих песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр, расположенных в бассейне реки Вилюй (Центральная Якутия) с учетом целей и задач инженерно-экологических исследований и инженерно-экологических изысканий. Авторами показано, что эколого-геологические системы тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр представляют собой типичные для Центральной Якутии уникальные природные песчаные образования, абиотические и биотические компоненты которых обладают специфическими особенностями. Песчаные литотопы эколого-геологические системы тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр имеют длительную историю формирования (30–40 тыс. лет), син- и эпикриогенный генезис, отличаются сложным строением, специфическими формами рельефа и парагенезом развитых в их пределах современных геологических процессов: эоловых, склоновых и криогенных, что находит своё отражение на биотических компонентах данных систем. Особенности биотических компонентов, указанных эколого-геологических систем (микробоценозы, фито- и зооценозы) полностью обусловлены климатическими условиями и литотопами, представленными массивами песчаных грунтов. Выявленные особенности необходимо учитывать в первую очередь при инженерно-экологических исследованиях и инженерно-экологических изысканиях на тукуланах.

Ключевые слова: экосистема, эколого-геологическая система, тукулан, эколого-геологические особенности, литотоп, эдафотоп, микробоценоз, фитоценоз, зооценоз, Якутия.

ВВЕДЕНИЕ

Эколого-геологическая система (ЭГС) представляет собой часть экосистемы, образованной абиотическими компонентами (литотопом – массивом грунтов, как литогенной основой ЭГС и эдафотопом – почвами) и биотическими компонентами (микробоценозом, фитоценозом и зооценозом), взаимосвязанными и взаимообусловленными между собой (Трофимов, 2009; Королёв, Трофимов, 2022). Особенности ЭГС, сформировавшихся на различных литотопах, изучены недостаточно. В частности, слабо изучены особенности литотопов тукуланов – уникальных и специфических песчаных образований, широко распространенных во многих регионах Сибири.

Цель настоящей работы – охарактеризовать особенности ЭГС тукуланов на примере двух схожих песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр, расположенных в бассейне реки Вилюй, для целей инженерно-экологических исследований и инженерно-экологических изысканий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы легли материалы полевых исследований авторов в 2018 году в Центральной Якутии, а также опубликованные данные.

Песчаные массивы Махатта и Кысыл-Сыр расположены в среднем течении реки Вилюй примерно в 40 километрах друг от друга и характеризуются схожими особенностями строения толщ, рельефа, состава пород (рис. 1, 2).

Тукулан Махатта расположен в 10 км выше поселка Кысыл-Сыр и простирается вглубь на 25 км от левобережья реки Вилюй. Гипсометрическая поверхность тукулана полого

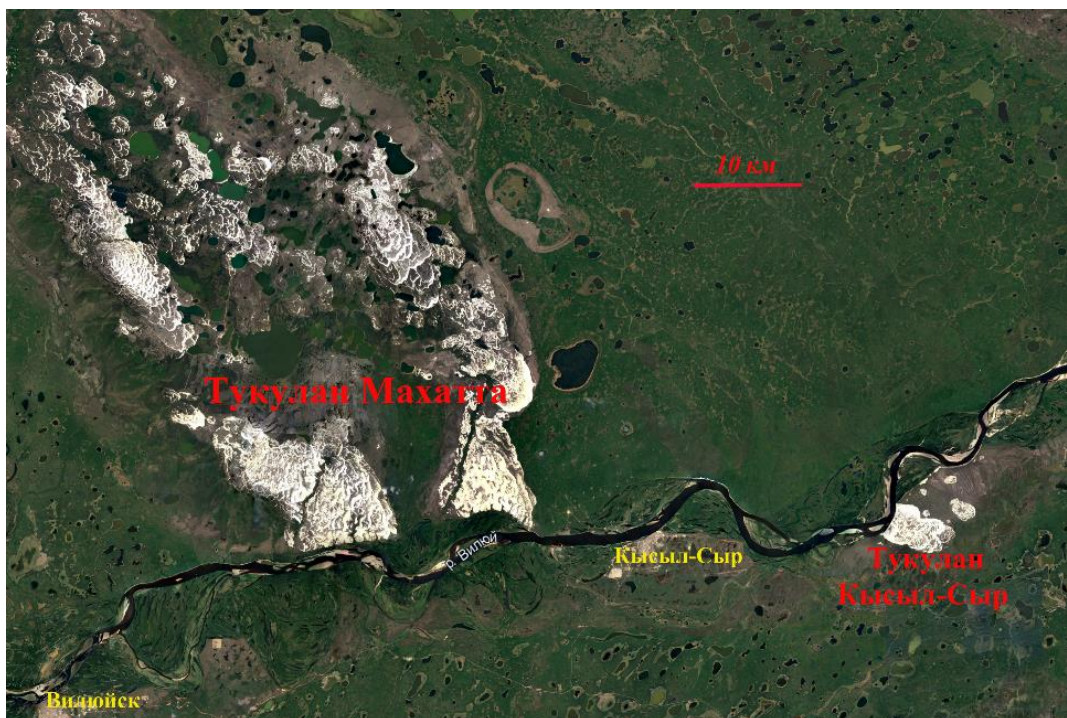


Рис. 1. Расположение тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр (Космоснимок..., 2023)

повышается от реки в сторону водораздела от 90 до 160 м над ур. м. Махатта относится к самым крупным незакрепленным дюнным массивам, его площадь превышает 400 км² (Галанин и др., 2016). Естественные обнажения эоловых песков приурочены к бортам эрозионных понижений.

Кысыл-Сырский тукулан образует поверхность первой надпойменной террасы высотой 30–36 м правобережья реки Вилой в 30 км ниже поселка Кысыл-Сыр. В морфологическом отношении тукулан асимметричен: северная и западная его части более высокие и имеют абсолютные отметки до 116 м, южная и восточная части – 85–90 м. Длина массива составляет около 6 км, ширина – до 4 км, площадь 14 км². Естественное обнажение представляет собой речной обрыв протяженностью около 3 км (Павлова и др., 2015).

Рельеф песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр характеризуется наличием эоловых форм, свойственных «классическим» пустыням – системы гряд, бугров и дюн чешуевидных параболических, реже серповидных и копьевидных разных порядков высотой до 15–20 м (см. рис. 2). На бровке берегового обрыва Кысыл-Сырского тукулана развита накидная дюна протяженностью более 2 км. В срединной части тукулана Махатта встречаются также продольные и поперечные дюны. Средняя длина элементарных дюн варьирует от 100 до 150 м, высота бровок 3–6 м. На тукулане Махатта встречаются дюны длиной до 250 м, а высота превышает 20 м. Наветренный склон активных дюн пологий (12–15°) и чаще всего полностью лишен растительного покрова. Подветренный склон элементарных дюн более крутой, осыпающийся, близок к углу естественного откоса (25–30°).

Ширина котловин выдувания составляет в среднем от 50 до 150 м (редко до 300 м), глубина достигает 6–10 м. Поверхность их покрыта крупным песком и гравием, лишена растительного покрова. Обнаженные пески по площади превышают закрепленную растительностью поверхность (например, для тукулана Кысыл-Сыр лишь около 10 %). Микрорельеф более низких порядков представлен формами от нескольких сантиметров до 10 м: знаки эоловой ряби, эолово-биогенные бугры диаметром до 7–8 м и высотой 3–4 м, формирующиеся в результате аккумуляции песка кустарниковыми формами березы, тополя, ивы, кедрового стланика (Павлова и др., 2015).



Рис. 2. Литотопы тукуланов

a, b – Махатта; *c, d, e* – Кысыл-Сыр (фото: *a, c, d* – С. Д. Балыковой; *b, e* – А. А. Галанина).

Указанные тукуланы изучались в ходе маршрутных исследований в полевые сезоны 2018–2019 годов, а также в последующие периоды камеральных работ 2020–2022 годов. Основными методами полевых исследований были натурные наблюдения за абиотическими

и биотическими компонентами эколого-геологических систем с их документированием, а также опытные испытания песков на обнажениях и в горных выработках, закладываемых по профилям. В результате этого удалось оценить изменчивость песчаных отложений тукуланов по разрезам и выявить их геологические особенности. В камеральный период осуществлялась систематизация собранного материала, анализ отобранных образцов песков, определение видового состава отмеченных растений и животных. Минеральный состав песков изучался с помощью рентгеновского дифрактометра¹.

Всё это позволило в итоге получить обобщенные данные по эколого-геологическим особенностям изучаемых тукуланов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Литотопы песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр

История формирования описываемых тукуланов за последние 40 тыс. лет представляется следующей (Павлова и др., 2017):

- 1) в позднем плейстоцене началось и произошло активное развитие указанных тукуланов;
- 2) в раннем голоцене – начале среднего голоцена оно сменилось постепенным затуханием их формирования;
- 3) около 2500 л. назад началась новая фаза развития изучаемых тукуланов, которая продолжается и по настоящее время.

Строение песчаных толщ тукуланов изучалось в бортах термоэрозионных цирков (тукулан Махатта) и в уступе террасы реки Вилюй (тукулан Кысыл-Сыр). Полевое описание и опробование разрезов показало, что строение толщ неоднородно, представлено пачками песков различного генезиса и возраста, но в целом идентично для обоих тукуланов (рис. 3) (Галанин и др., 2018):

– в основании толщи залегает пачка позднеплейстоценовых (каргинский термохрон) переслаивающихся пакетов косо- и горизонтально-слоистых среднезернистых песков с прослоями супесей, с тонкими линзами мелкого гравия; венчает аллювиальный горизонт слой тонкослоистых темно-серых до сизого пылеватых супесей (пойменно-старичная фация, в разрезах тукулана Махатта также описана болотная фация, представленная торфом мощностью до 0,7 м) с примесью рассеянной органики и тонкого растительного детрита; видимая мощность аллювия до 15 м;

– на аллювиальных песках залегают позднеплейстоценовые (сартанский криохрон) перекрестно-слоистые светло-желтые с охристым оттенком среднезернистые эоловые пески мощностью до 15–20 м;

– разделяет две пачки эоловых песков хорошо выдержанный горизонт погребенной почвы, свидетельствующий о продолжительном периоде практически полного закрепления дюнного массива; по данным радиоуглеродных датировок проб из данного горизонта закрепление массивов тукуланов происходило на протяжении бореального оптимума голоцена 9–3,5 тыс. лет назад;

– верхний горизонт голоценовых незакрепленных светло-желтых и светло-серых эоловых песков характеризуется переменной мощностью – от 0 до 20 м; горизонт характеризуется более резкой перекрестной слоистостью;

– для голоценовой толщи эоловых песков характерно большое количество вертикально погребенных стволов деревьев, невыдержанных прослоев слаборазвитых почв с многочисленными углями;

¹ Рентгенодифракционный анализ порошковых препаратов проводился при помощи рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV фирмы Rigaku (Япония), приобретенного за счет средств «Программы развития Московского университета имени М.В. Ломоносова».

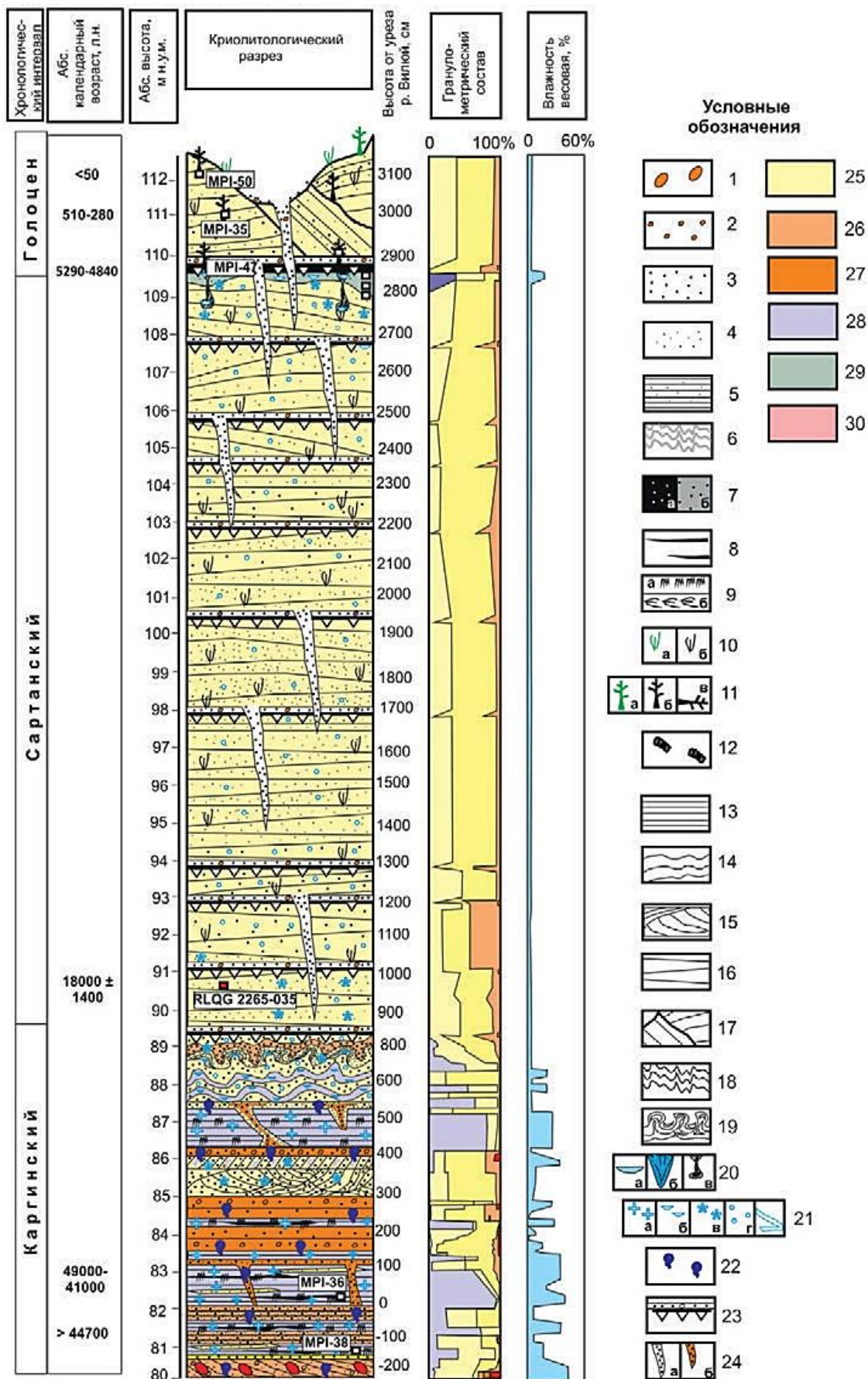


Рис. 3. Строение и возраст криогенно-эоловых отложений тукулана Кысыл-Сыр в нижнем течении реки Вилюй (Галанин и др., 2015)

Литология (1–12): 1 – галька; 2 – гравий; 3 – крупный песок; 4 – мелкий песок (супесь); 5 – ил (суглинок); 6 – гумусированные прослой суглинка; 7 – гумус с примесью песка (а) и песок с примесью гумуса (б); 8 – прослой и линза растительного детрита; 9 – кустарничковый (а) и травянистый (б) торф; 10 – живые (а) и вертикально погребённые стебли и куртины злаков (б); 11 – живые (а) и ископаемые (б, в) деревья: б – вертикально захороненные, в – горизонтально захороненные; 12 – уголь и фрагменты окаменелой древесины тропических видов. Текстуры седиментационные (13–19): 13 – тонкослоистая горизонтальная; 14 – волнистая неравномерно слоистая; 15 – тонкая косослоистая и линзовидная; 16 – неравномерно перекрёстно-слоистая с вариацией толщины элементарных слоев от 1 мм до 30 см; 17 – грубая косослоистая; 18 – плейчатая микротурбированная; 19 – интенсивно криотурбированная диапировая. Крупные включения льда (20): а – тонкие линзы и шпирьы сублимационных льдов; б – вертикальные ледяные жилы полигонального типа; в – мёрзлые грунтовые (суглинисто-гумусовые жилы). Криотекстуры цементирующего льда (21): а – массивная; б – плетенчатая и атакситовая; в – комковатая (сублимационная); г – контактная (сублимационная). Талики (22): талые водоносные горизонты и участки выхода межмерзлотных вод. Прочие элементы: 23 – седиментационные несогласия, поверхности интенсивной дефляции; 24 – сухомёрзлые син- и эпигенетические жилы: а – заполненные кварцевым песком, б – интенсивно ожелезненные (зоны дренажа и загрузки поверхностных вод). Гранулометрический состав грунтов (25–30): 25 – гравий, мелкая галька (> 2 мм); 26 – гравелистый песок (1–2 мм); 27 – крупный песок (0,5–1,0 мм); 28 – средний песок (0,50–0,25 мм); 29 – мелкий песок (0,25–0,10 мм); 30 – супесь, суглинок, глина (< 0,1 мм).

– для всех эоловых песков характерно наличие нескольких порядков слоистости, обусловленных сезонной микрослоистостью (зимние и летние слойки), микродефляционными несогласиями (чередование периодов дефляции с аккумуляцией) и перекрёстно-слоистыми структурами; слоистость обусловлена дифференциацией материала по гранулометрическому и/или минеральному составу; мощность отдельных слойков, как правило, не превышает первых сантиметров (рис. 4).

У оснований тукуланов, в бортах откосов и в днищах термоэрозионных цирков, залегают отложения, формирующиеся за счет осыпания и суффозионного выноса материала из песчаных толщ и дальнейшего его перемывания талыми, дождевыми и родниковыми водами. Мощность этих песчаных образований от нескольких см до 2–2,5 м (пролювиальные террасы). Строение отложений горизонтально-слоистое, обусловленное сезонностью их формирования. Пески характеризуются высокой влажностью, а залегающие в днищах термоэрозионных цирков – обводнены.

Геофизические и геотермические исследования массивов тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр (Шепелев, 2011) показали наличие сложных мерзлотно-гидрогеологических условий этих толщ, наличие внутри них системы межмерзлотных таликов, мощность которых составляет 25–30 м, иногда превышает 40–60 м (рис. 5).

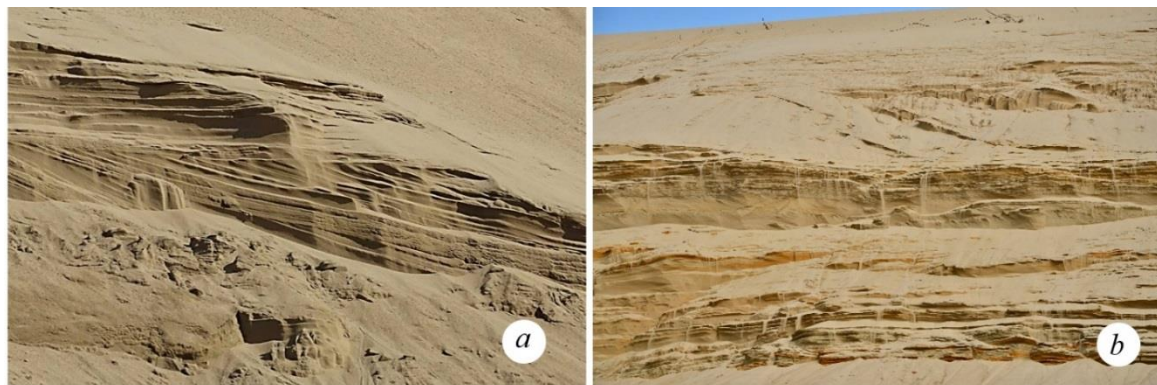


Рис. 4. Косослоистая и параллельная слоистость эоловых песков

а – в толще тукулана Махатта (фото А. А. Галанина); б – в толще тукулана Кысыл-Сыр (фото С. Д. Балыковой).

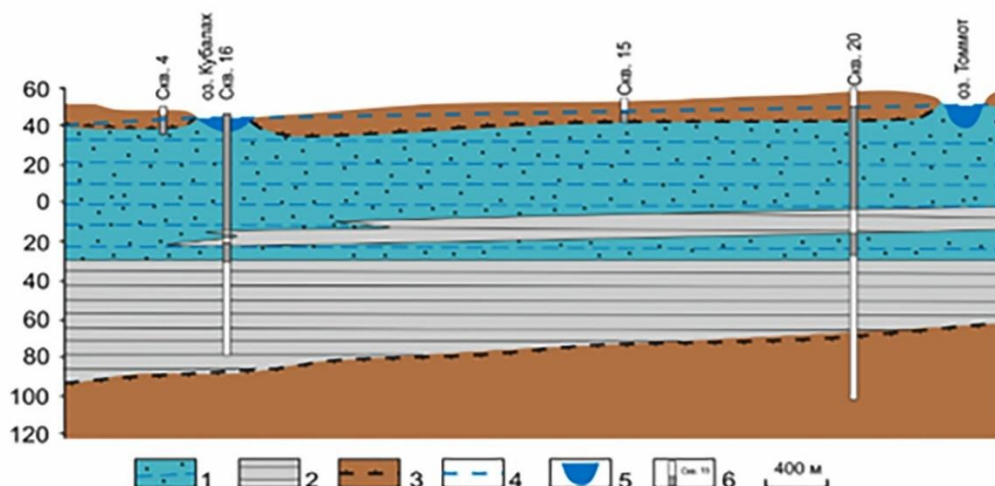


Рис. 5. Мерзлотно-гидрогеологический разрез массива Махатта (Шепелев, 2011)
 1 – пески водоносные; 2 – литологические водоупоры; 3 – мерзлые горные породы и границы их распространения; 4 – уровень надмерзлотно-межмерзлотных подземных вод; 5 – озерные котловины; 6 – скважины.

Разгрузка межмерзлотных вод из толщ тукулана Махатта происходит в термоцирках, в основании берегового обрыва тукулана Кысыл-Сыр – в виде подземных источников с видимым дебитом 3–4 л/с каждый, некоторые из них фонтанируют в виде грифонов высотой до 30–40 см (рис. 6). В центре тукулана Махатта в долине ручья Мугур-Тарын известен круглогодичный источник с дебитом около 760 л/с. Воды холодные (температура близка к 0 °С), желтоватого цвета, имеют выраженный железистый вкус и сероводородный запах, гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 20–40 мг/л. Отмечается повышенное содержание в подземных водах кремнекислоты – до 36 мг/л (Шепелев, 1976, 2011).



Рис. 6. Участки разгрузки межмерзлотных подземных вод в термоцирке в основании тукуланов Махатта (а) и Кысыл-Сыр (b) (фото С. Д. Балыковой)

Температурное поле толщ рассматриваемых тукуланов также характеризуется рядом особенностей (Галанин и др., 2018): 1) температурный режим дюнных массивов кардинально отличается от других типов мерзлых грунтов в прилегающих ландшафтах; 2) на подошве слоя годовых теплооборотов (СГТ) температура составляет 0...–1 °С, в то время как за пределами дюнных массивов эта температура варьирует от –2,5 до –7 °С; 3) мощность СГТ в пределах дюнных массивов составляет менее 5 м и практически совпадает с мощностью деятельного слоя; это в 2–2,5 раза меньше по сравнению с другими типами криолитогенных образований

региона; 4) максимальные температуры в приповерхностном слое на глубине 5 см достигают значений $+51,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а минимальные – до $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5) максимальная годовая амплитуда (до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдалась на поверхности незакрепленных дюн; минимальная годовая амплитуда поверхности ($65\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$) характерна для закреплённых массивов.

Среди криогенных текстур преобладают сублимационные, представляющие собой изморось, формирующуюся в результате конденсации водяного пара на поверхности зерен и в порах в пределах слоя годовых теплооборотов. Среди сублимационных криотекстур наиболее распространены контактная и тонкошлифовая, реже комковатая. Тонкошлифовая криотекстура представлена тонкими горизонтальными прослойками и пленками льда толщиной не более 0,5 мм, разделенными прослоями (1–5 см) сухомерзлого (морозного) песка. Пески аллювиального горизонта имеют массивную криотекстуру и является водоупором (Галанин и др., 2018).

По минеральному составу незакрепленные пески тукулана Махатта отнесены к кварцевым, закрепленные и все пески Кысыл-Сырского тукулана – к полевошпатово-кварцевым. Содержание кварца составляет 60–96 %, полевых шпатов для песков тукулана Махатта до 15 %, Кысыл-Сырского массива – 15–36 %, при этом в первом случае это калиевые полевые шпаты, во втором – и калиевые, и плагиоклазы. Для песков обоих тукуланов отмечено увеличение содержания полевых шпатов с глубиной. Другие минералы – гидрослюды, смешанослойные, каолинит, кальцит, тяжелые минералы (гранаты, эпидот, роговая обманка, циркон, пироксены, ильменит, ставролит) – присутствуют в виде примесей – не более 2 % (Харламова, Балыкова, 2019). Количественное соотношение содержания основных минералов в эоловых позднеплейстоценовых песках и аллювиальных песках каргинского времени, являющихся одним из источников формирования первых, в целом сохраняется. Характерная черта минерального состава аллювиальных пеков – высокое содержание биотита, мусковита и хлорита. Существенной дифференциации минерального состава по элементам эолового микрорельефа не выявлено (за исключением ниш выдувания).

За исключением обводненных таликовых зон эоловые пески, развеваемые и закрепленные, характеризуются низкой влажностью и льдистостью (менее 5 %), высокой пористостью. Весовая влажность (льдистость) аллювиальных отложений достигает 20–25 %. Все рассматриваемые эоловые пески являются однородными, хорошо отсортированными и, согласно классификации ГОСТ 25100–2020, относятся к пескам средней крупности, при этом в развеваемых песках преобладает фракция 0,25–0,5 мм, в закрепленных – 0,1–0,25 мм. В целом, отложения Кысыл-Сырского тукулана более дисперсны: пески мелкой фракции в закрепленной толще представлены в виде прослоев мощностью от 0,2 до 1,4 м, среднезернистые – являются вмещающими породами. Содержание частиц пылевато-глинистой фракции не превышает 1 % (Балыкова, Харламова, 2019).

Для эоловых песков тукуланов в целом характерны хорошо и средне окатанные песчаные зерна изометричной формы: преобладают зерна полуокруглой и округлой формы, иногда близкие к сферичной. Поверхность большинства песчаных зерен неровная, ямчатая или бороздчатая. В углублениях на поверхности многих зерен присутствуют остаточные аутигенные образования железистого состава; поверхность зерен песков, залегающих в зонах разгрузки межмерзлотных вод, в том числе находящиеся в настоящее время выше горизонта современной разгрузки, полностью покрыты железистой оболочкой охристого цвета.

Плотность эоловых песков незакрепленных массивов изменяется в диапазоне 1,55–1,69 г/см³, закрепленных повышается до 1,74 г/см³.

Среди экзогенных геологических процессов на территории тукуланов наибольшее развитие получили дефляция и эоловая аккумуляция. По наблюдениям В. В. Черных, тукуланы активно двигаются. Так, скорость передвижения песков Кысыл-Сырского массива составляет около 5–8 м/год (Урбан и др., 2013). Пески наступают на лесные массивы, постепенно засыпая хвойные леса. На поверхности незакрепленных котловин иногда наблюдаются вертикально стоящие и поваленные мертвые деревья, обнаженные в результате дефляции горизонты пней.

На крутых склонах береговых обрывов и бортов термоцирков развиты осыпи и обвалы, плоскостная эрозия дождевыми и тальными водами. В результате суффозионного выноса песчаного материала местами наблюдается осадка поверхности вышележащей толщи и образование суффозионных воронок и впадин.

В зимний период в результате разгрузки межмерзлотных вод в эрозионных цирках формируются наледи, таяние которых в совокупности с родниковыми водами провоцируют развитие линейной эрозии, вызывающей подмыв оснований склонов тукуланов и углубление днищ термоцирков.

Эдафотопы тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр

Почвенные образования рассматриваемых тукуланов изучались Ю. К. Васильчуком с соавторами (2021). Согласно их исследованиям на хорошо дренированных породах песчаного гранулометрического состава, слагающих вершинные поверхности и пологие склоны надпойменных террас Вилюя (рис. 7) наблюдаются профили дерново-подзолов и дерново-подбуров иллювиально-железистых, для которых характерны одновременное проявление дернового процесса с элювированием железосодержащих частиц из верхней части в нижнюю.

Об активном протекании последнего процесса также говорит наличие в нижних частях профилей этих почв, обогащённых Fe горизонтальных прослоев – псевдофибров. В частности, дерново-подзол иллювиально-железистый языковатый псевдофибровый маломощный песчаный, разрез которого был заложен на вершинной поверхности II надпойменной террасы, имел на глубинах 51–115 см горизонт BFff, на рыжевато-буром фоне которого видны многочисленные узкие более тёмные полосы. А в дерново-подзоле иллювиально-железистом псевдофибровом среднемощном песчаном на пологом склоне II надпойменной террасы на глубинах 30–55 см расположен горизонт BF'ff – белёсо-палевый с горизонтальными рыжими полосами. На вершинной поверхности I надпойменной террасы был вскрыт разрез дерново-подбура иллювиально-железистого оподзоленного среднемощного песчаного, где на уровне признака в горизонтах AYe и BFe проявляется процесс элювирования, даже наблюдается весьма контрастное новообразование, включённое в горизонт почвообразующей породы (Васильчук и др., 2021).

На тукуланах Махатта и Кысыл-Сыр в разных частях наблюдаются выходы погребенных почв (рис. 8).

Значения pH почв тукулана Махатта варьируют в пределах от 2,81 до 7,61 (Васильчук и др., 2021). Реакция среды от сильнокислой до нейтральной. Для большей части почв характерно монотонное распределения значения pH, при этом наиболее часто встречаются значения pH в районе 5–6, что соответствует слабокислой реакции среды. Более кислая реакция характерна для горизонтов с высоким содержанием органического вещества и болотных почв, формирующихся в понижениях и таликах.

Микробо- и фитоценозы песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр

Микробные сообщества указанных тукуланов пока изучены недостаточно. В видовом отношении они довольно бедны и представлены в основном цианобактериями, низшими микроскопическими грибами и водорослями. Биомасса микробных сообществ рассматриваемых тукуланов распределена неравномерно: наименьшее количество характерно для незакрепленных песчаных участков возвышенностей, а наибольшее – для закрепленных частей тукуланов и заболоченных участков понижений.

Фитоценозы песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр относятся к Вилуйскому округу Центрально-Якутской среднетаежной подпровинции подзоны среднетаежных лесов и

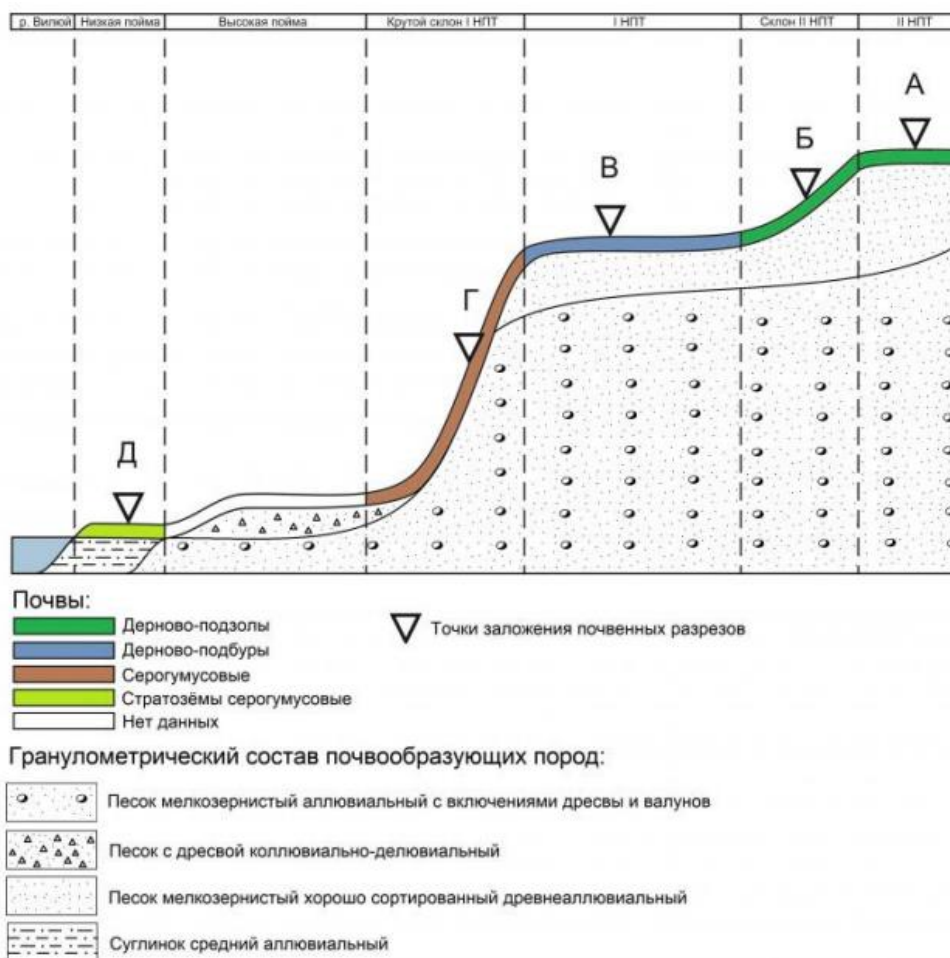


Рис. 7. Почвенная catena тукулана Махатта на левом берегу реки Вилой (Васильчук и др., 2021)

А – дерново-подзол иллювиально-железистый языковатый псевдофибровый маломощный песчаный на песчаных древнеаллювиальных отложениях; Б – дерново-подзол иллювиально-железистый псевдофибровый среднемощный песчаный на песчаных древнеаллювиальных отложениях; В – дерново-подбур иллювиально-железистый оподзоленный среднемощный песчаный на песчаных древнеаллювиальных отложениях; Г – серогумусовая ожелезнённая среднемощная песчаная почва со слабо развитым профилем на древнеаллювиальных слоистых отложениях подстилаемых валунистыми обломками метаморфических пород; Д – стратозём серогумусовый водно-аккумулятивный на погребенной аллювиальной слоистой почве.

характеризуется развитием сосняков (*Pinus sylvestris*) с редким подростом березы (*Betula* sp.) и мохово-лишайниковым покровом. Площадь проективного покрытия растительности на плоской субгоризонтальной поверхности тукулана Махатта не превышает 30 % (Васильчук и др., 2021).

Исследование видового состава лишайников на тукуланах Махатта и Кысыл-Сыр выявило шесть видов эпилитных лишайников-псаммофитов, встречающихся непосредственно на поверхности песков и способствующих их закреплению: *Diploschistes muscorum*, *Trapeliopsis granulosa*, *Baeomyces carneus*, *Cladonia coccifera*, *Placynthiella uliginosa*, *Stereocaulon* sp. (рис. 9 а). Кроме того, тут на песках также отмечены лишайники-эпилиты: *Baeomyces carneus*, *Cladonia botrytes*, *C. cariosa*, *C. furcata*, *C. grayi*, *C. imbricarica*, *C. macrophyllodes*, *C. stricta*, *C. uncialis*, *C. verticillata* (Галанин, 2016 а, б).



Рис. 8. Погребенные почвы (a, b) тукулана Кысыл-Сыр (фото С. Д. Балыковой)



Рис. 9. Синузия лишайников (*Cladonia* sp. и др.) на тукулане Махатта (a) (фото С. Д. Балыковой) и фитоценоз осокового болота в междюнном понижении тукулана Кысыл-Сыр (b) (фото А. А. Галанина, 2015)

Наряду с эпилитами здесь обнаружены лишайники-сапрофиты и эпифиты, встречающиеся на растительном опаде и остатках на поверхности тукуланов. Это такие виды как *Caloplaca tetrasporella*, *Cladonia chlorophaea*, *C. furcata*, *C. macilenta*, *Placynthiella uliginosa*, *Rinodina laevigata*, *R. mniaraea*, *R. olivaceobrunnea*. Они также способствуют зарастанию и стабилизации тукуланов.

Наконец, на тукуланах по гарям, оставшимся после пожаров сосняков, также отмечены специфические виды лишайников, которые селятся на углях. Среди них здесь отмечены: *Cladonia botrytes*, *C. macilenta*, *C. rei*, *Hyposcyon* характеризовался развитием усе *castaneocinerea*, *Peltigera leucophlebia*, *Trapeliopsis flexuosa*. Отмеченные виды лишайников также способствуют зарастанию тукуланов после пожаров.

На песках этих тукуланов встречаются и высшие шляпочные грибы.

Для анализируемых тукуланов характерно образование междюнных понижений, в которых формируются талики и происходит заболачивание (рис. 9b). На таких участках развивается болотная растительность из мхов и осоки с зарослями багульника (*Ledum*) и мирта обыкновенного (*Myrtus communis*), а также происходит возникновение редких в природе ассоциаций из ксерофитной и гидрофильной растительности (Галанин и др., 2016).

По краям этих тукуланов также часто наблюдается наступание песков на лес (рис. 10). Местами на тукулане Кысыл-Сыр развиты сосняки (*Pinus sylvestris*), кедровый стланик (*Pinus pumila*), в нижних частях склонов растет кустарниковая ольха (*Alnus fruticosa*). Во внутренней части поймы реки Вилюй у подножия тукулана в еловом лесу растет багульник болотный



Рис. 10. Наступание песков тукулана Махатта на сосново-толокнянковый лес, среднее течение реки Вилюй
 а – фото А. В. Галанина, 2012; б – фото С. Д. Балыковой, 2018.

(*Ledum palustre*), голубика (*Vaccinium uliginosum*, рис. 11а), таран (рис. 11б) и хамедафне (*Chamaedaphne calyculata*), которые на внешней части террасы не встречаются (Галанин, 2012).

Большинство растений-псаммофитов на тукуланах Кысыл-Сыр и Махатта хорошо приспособлено к местным условиям существования: они имеют мощную корневую систему, песчаные чехлики на корнях и др. и выступают как пионеры закрепления развеваемых песков (рис. 12). На поверхности дюн, особенно на их подветренных склонах, развиты группировки и куртины травянистых растений; полужакопленные понижения между дюн заняты редкими зарослями кустарников из голубики, шиповника, багульника, кустарниковой березы.

Закрепленные гряды и другие формы песчаного рельефа покрыты сосновыми лесами и зарослями кедрового стланика. Последние имеют особую роль в закреплении подвижных песков. Еще Т. А. Работнов (1935) отметил, что кедровый стланик является реликтом



Рис. 11. Растительность песков на тукулане Кысыл-Сыр (фото С. Д. Балыковой)
 а – голубика (*Vaccinium uliginosum*); б – таран узколистный (*Aconogonon angustifolium*); в – береза белая (*Betula alba*).

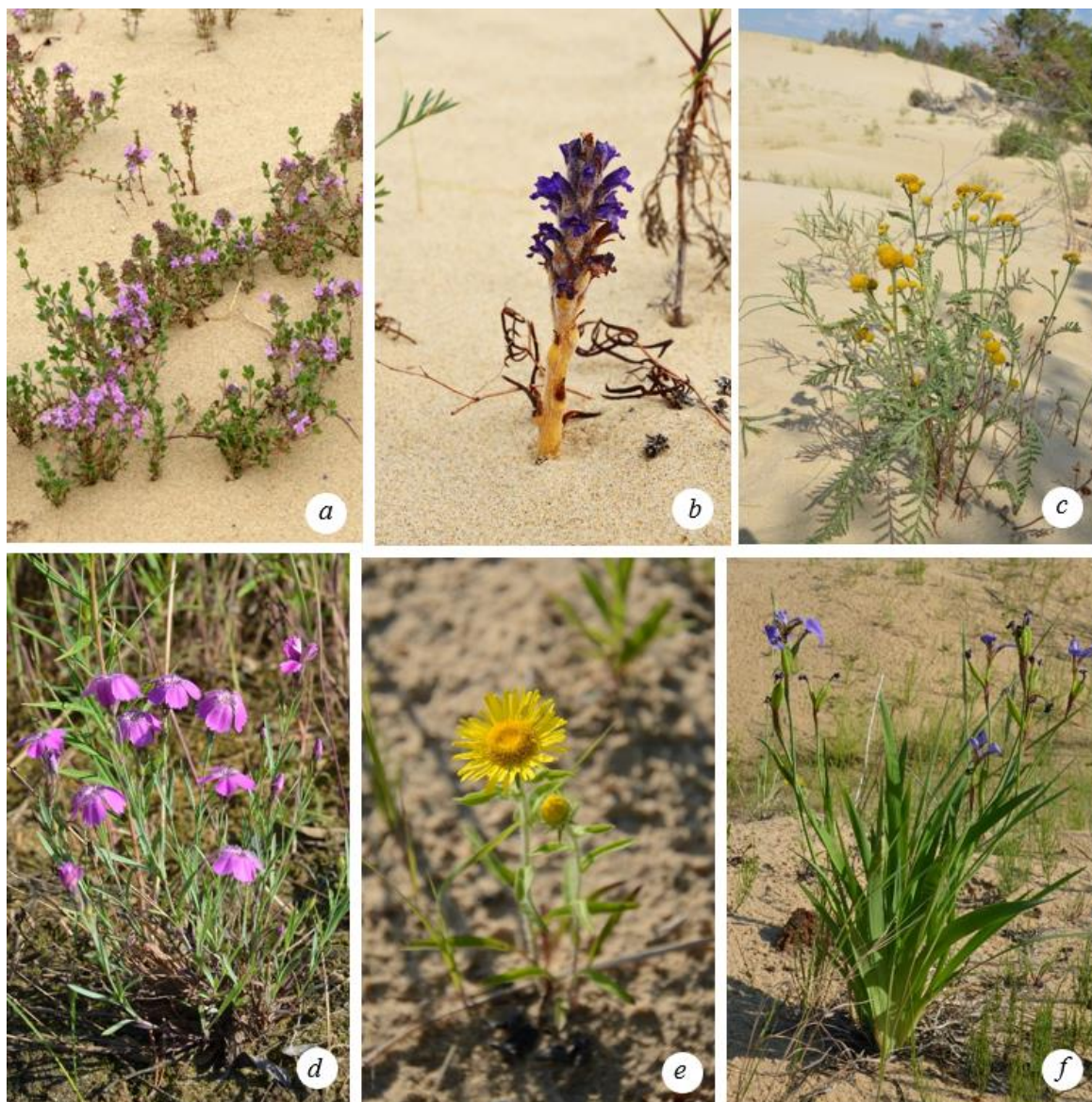


Рис. 12. Растения на песках тукуланов Махатта (c–f) и Кысыл-Сыр (a, b)
(фото С. Д. Балыковой)

a – тимьян Сергиевской (*Thymus sergievskajae*); b – зарази́ха (*Orobanche coerulea*); c – пижма тысячелистниковая (*Tanacetum achilleifolium*); d – гвоздика (*Dianthus versicolor*); e – девясил (*Inula britannica*); f – ирис щетинистый (*Iris setosa*).

ледниковой эпохи, хорошо приспособившийся в современную эпоху к местным условиям эоловых образований. Будучи требовательным к влажности воздуха, кедровый стланик образует густые заросли лишь в таких местах, где пески соседствуют с озерами и болотами. Все эти растения хорошо приспособлены против засыпания песком, но неизбежно погибают на выдуваемых участках от оголения корневой системы. Говоря о растительности тукуланов в целом, можно заметить, что видимо, слабее закреплены растительностью более молодые песчаные массивы, а древние эоловые пески полностью заняты лесами и зарослями кустарников (Галанин, 2012).

Есть тукуланы, на которых кедровый стланик отсутствует или чрезвычайно редок. В частности, его нет на тукулане Кысыл-Сыр, хотя на малом дальнем тукулане, не выходящем на берег реки, кедровый стланик присутствует. Можно предположить, что на тукулاناх,

возникших на месте сосновых лесов недавно, кедровый стланик отсутствует. Этот вид расселяется сойками и кедровками весьма медленно.

В ходе исследований, проведенных М. Р. Павловой с соавторами (2017) на тукуланах Махатта и Кысыл-Сыр, выделено семь ландшафтных комплексов, для которых характерно существенное разнообразие почвенного и растительного покрова.

1. Древняя слабоволнистая поверхность донных массивов с сосновым лесом толокнянково-брусничным лишайниковым покровом на подзолах иллювиально-железистых. Древостой здесь состоит преимущественно из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с примесью березы пушистой (*Betula pubescens*), березы повислой (*B. pendula*) и березы Каяндера (*B. cajanderi*). В кустарниковом ярусе произрастают: толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uvaursi*), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitisidaea*), прострел раскрытый (*Pulsatilla patens*), камнеломка колючая (*Saxifraga spinulosa*), вейник сжатый (*Calamagrostis koibalensis*). В моховых куртинах преобладает политрих обыкновенный (*Polytrichum commune*), а также произрастают томентгипнум блестящий (*Tomentypnum nitens*), птилиум гребенчатый (*Ptilium cristacastrensis*), и дрепаноклад плауновидный (*Drepanocladus lycopodioides*). Данную ассоциацию можно выделить как *Pinetum arctostaphylosum vaccinosum*.

2. Древняя поверхность донных массивов с сосновым лесом лишайниково-толокнянковым покровом на подбурах гумусовых иллювиально-железистых. В древостое на них доминирует сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), в подлеске – роза иглистая (*Rosa acicularis*), можжевельник сибирский (*Juniperus sibirica*), редко ольха кустарниковая (*Alnus fruticosa*). В кустарничково-травянистом ярусе здесь преобладает толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uvaursi*). Встречается также прострел желтеющий (*Pulsatilla flavescens*), иванчай узколистный (*Chamerion angustifolium*), особенно по горям, а также лук торчащий (*Allium strictum*), звездчатка (*Stellaria* sp.), вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis baicalensis*), пырей мохнатый (*Elytrigia villosa*), овсяница ушковатая (*Festuca auriculata*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), тонконог Караваева (*Koeleria karavajevii*). Кроме того, в напочвенном покрове отмечены плаунок сибирский (*Selaginella rupestris*) и лишайники родов *Cladonia*, *Centraria*, различные виды мхов. Данную ассоциацию можно выделить как *Pinetum cladosum arctostaphylosum*.

3. Междонные понижения с возобновляемым растительным покровом на подзолах иллювиально-железистых. В основном в таких понижениях произрастает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*). Присутствует редкое возобновление березы плосколистной (*Betula platyphylla*), березы белой (*B. alba*, см. рис. 12c), ели сибирской (*Picea obovata*), ивы Бейба (*Salix bebbiana*), тополя душистого (*Populus suaveolens*). В напочвенном покрове развиты: толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uvaursi*), голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum*), брусника обыкновенная (*V. vitisidaea*), болотный мирт обыкновенный (*Chamaedaphne calyculata*), подбел обыкновенный (*Andromeda polifolia*), багульник болотный (*Ledum palustre*), клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus*), а также лишайники и мхи. Данную ассоциацию можно выделить как *Pinetum betulosum arctostaphylosum*.

4. Незакрепленные поверхности тукуланов с редко стоящими угнетенными деревьями на эоловых отложениях. Растительные группировки на незакрепленных поверхностях песков состоят из травянистых растений, кустарников и деревьев. Из деревьев и кустарников преобладают сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), береза плосколистная (*Betula platyphylla*), береза белая (*B. alba*), лиственница даурская (*Larix gmelinii*), кедровый стланик (*Pinus pumila*), ольха кустарниковая (*Alnus fruticosa*), ива росистая (*Salix rorida*), свидина белая (*Swida alba*). Из травянистых растений: овсяница ушковатая (*Festuca auriculata*), щавель злаколистный (*Acetosella graminifolia*), горец узколистный (*Aconogonon angustifolium*, см. рис. 11b), полынь замещающая (*Artemisia commutata*), полынь Караваева (*A. karavaevii*), тимьян азиатский (*Thymus asiaticus*), тимьян Сергиевской (*Th. sergievskajae*, см. рис. 12a), хвощ полевой (*Equisetum arvense*), пырей мохнатый (*Elytrigia villosa*), вздутоплодник сибирский (*Phlojodicarpus sibiricus*), заразиха синеватая (*Orobancha coerulescens*, см. рис. 12b),

колокольчик Лангсдорфа (*Campanula angsdorffiana*), тонконог Скрябина (*Koeleria skrjabinii*), тонконог Караваева (*K. karavajevii*). Данную ассоциацию можно выделить как *Pinetum festucosum*.

5. Эолово-биогенные бугры и кочки на поверхности подвижных песков, склонов и гребней дюн с редкостоящими угнетенными деревьями на псаммоземах обыкновенных. Биогенно-эоловые кочки имеют высоту от 10 до 60 см, диаметр 5–45 см, представлены в основном такими растениями как полынь Караваева (*Artemisia karavaevii*), полынь замещающая (*A. commutata*), тимьян Сергиевской (*Thymus sergievskajae*, см. рис. 12а), тонконог сизый (*Koeleria glauca*), вейник сжатый (*Calamagrostis koibalensis*), щавель злаколистный (*Acetosella graminifolia*), горец узколистный (*Aconogonon angustifolium*). Высота биогенно-эоловых бугров составляет в среднем 3–4 м, диаметр 7–8 м. Они представлены такими растениями как береза Каяндера (*Betula cajanderi*), береза плосколистная (*B. platyphylla*), береза тощая (*B. exilis*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), ива Бебба (*Salix bebbiana*), тополь душистый (*Populus suaveolens*). Данную ассоциацию можно выделить как *Pinetum artemisium*.

6. Заболоченная ложбина стока с березовым ерником и багульниково-голубичным покровом на торфянистых глееватых мерзлых почвах. Здесь доминирует береза тощая (*Betula exilis*), содоминанты – болотный мирт обыкновенный (*Chamaedaphne calyculata*), багульник болотный (*Ledum palustre*), голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum*). На пятнах сфагнов обычна клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus*), в сырых понижениях – хвощ приречный (*Equisetum fluviatile*). На более сухих микроповышениях обычен тимьян азиатский (*Thymus asiaticus*). Данную ассоциацию можно выделить как *Betuletum ledumosum chamaedaphnosum*.

7. Поверхность второй надпойменной террасы реки Вилюй, перекрытая древними и современными дюнами с лиственничным лесом и бруснично-багульниковым покровом на криоземах глееватых ненасыщенных почвах. В древостое здесь доминирует лиственница даурская (*Larix gmelinii*) с примесью березы плосколистной (*Betula platyphylla*). В напочвенном покрове доминируют арктобореальные кустарнички – такие как багульник стелющийся (*Ledum decumbens*), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitisidaea*), голубика обыкновенная (*V. uliginosum*). Встречаются также хвощ болотный (*Equisetum palustre*), и осоки (*Carex globularis*, *C. caespitosa*). Данную ассоциацию можно выделить как *Larixetum ledumosum vaccinosum*.

На основе этого для рассматриваемых тукуланов можно выделить семь растительных ассоциаций (табл. 1).

Палинологические исследования тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр, а также данные радиоуглеродного анализа показали, что за последние 40 тыс. лет происходила закономерная смена растительных сообществ на поверхности и вокруг этих тукуланов (Павлова и др., 2017). На раннем этапе (каргинский интерстадиал – сартанский стадиал) здесь происходило развитие лиственнично-кустарниковых редколесий с примесью березы *Betula sectalbae*, а также различных вариантов кустарниковых тундр, обедненных степей и лугов, а также островным развитием еловых лесов. В сартанский стадиал произошло полное исчезновение древесной растительности и развитие криостепей, каменистых полупустынь и пустынь. Затем (9900–6700 кал. л. н.²) они сменились лесотундрой с заболоченными участками. Позже (6700–3300 кал. л. н.) на тукуланах стали формироваться сосновые леса с примесью березы, и на последнем этапе (2600–700 кал. л. н.) образовались сосновые леса и горельники, сохранившиеся до наших дней.

² кал. л. н. – сокращенное написание кода датировки калиброванного значения радиоуглеродного возраста, лет назад.

Таблица 1

Растительные ассоциации тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр

| Растительная ассоциация | Геоморфологический элемент тукулана | Почва |
|---|---|--|
| 1. <i>Pinetum arctostaphylosum vaccinosum</i> | Древняя слабоволнистая поверхность дюн | Подзолы иллювиально-железистые |
| 2. <i>Pinetum cladosum arctostaphylosum</i> | Древняя поверхность дюн | Подбуры гумусовые иллювиально-железистые |
| 3. <i>Pinetum betulosum arctostaphylosum</i> | Междюнные понижения | Подзолы иллювиально-железистые |
| 4. <i>Pinetum festucosum</i> | Незакрепленные поверхности тукуланов | Псаммозёмы |
| 5. <i>Pinetum artemisosum</i> | Эолово-биогенные бугры и кочки на поверхности подвижных песков, склонов и гребней дюн | Псаммозёмы обыкновенные |
| 6. <i>Betuletum ledumosum chamaedaphnosum</i> | Заболоченная ложбина стока | Торфянистые глееватые мёрзлые почвы |
| 7. <i>Larixetum ledumosum vaccinosum</i> | Поверхность 2-й надпойменной террасы | Глееватые ненасыщенные криозёмы |

Зооценозы песчаных массивов Махатта и Кысыл-Сыр

Зооценозы изучаемых ЭГС во многом обусловлены особенностями фитоценозов, рассмотренными выше. Это в первую очередь касается животных фитофагов и дендробионтов – они концентрируются в основном в пределах закрепленных участков этих тукуланов, там, где развиты сосняки и стланики, а также в пределах западин с развитой болотной растительностью. В целом же можно сказать, что относительная изолированность тукуланов друг от друга способствует формированию в их пределах эндемичных видов растений и животных, особенно бескрылых.

На песчаных поверхностях тукуланов отмечены различные паукообразные (Arachnida), в том числе крестовик *Araniella displicata* (рис. 13), тяготеющий к песчаным соснякам, и другие пауки-хищники. Однако в целом фауна паукообразных рассматриваемых тукуланов, как и их энтомофауна, изучены всё ещё недостаточно.

На тукуланах относительно богата фауна различных насекомых. Здесь отмечены равнокрылые (Homoptera), ручейники (Trichoptera), особенно многочисленные на заболоченных и эрозионных понижениях, а также прямокрылые (Orthoptera) и полужестокрылые (Hemiptera), среди которых преобладают цветочные клопы-фитофаги.

Среди перепончатокрылых (Hymenoptera) на цветущих растениях многочисленны различные шмели (рис. 14а) и другие пчелы (Apoidea).

Как и в других регионах Центральной Якутии на изучаемых тукуланах широко встречаются двукрылые (Diptera), в том числе различные кровососущие – слепни (Tabanidae), среди которых преобладают обычные для Центральной Якутии *Chrysops makerovi*,



Рис. 13. Паук *Araniella displicata* на песках тукулана Кысыл-Сыр (фото С. Д. Балыковой)

Ch nigripes, *Ch. relictus*, *Ch. validus*, *Hybomitra arpadii*, *H. bimaculata*, *H. ciureai*, *H. lundbecki*, *H. lurida*, *H. montana* и другие (рис. 14b), а также оводы (*Oestridae*). Кроме того, на тукуланах многочисленны кровососущие комары (*Culicidae*), а также мошка (*Simulidae*), мокрецы (*Ceratorogonidae*) и другие двукрылые (рис. 14c). На цветущих растениях тукуланов встречаются различные мухи-журчалки (*Syrphidae*).

Из жуков на песках тукулана Кысыл-Сыр нами отмечены жужелицы (*Carabidae*), жуки-чернотелки (*Tenebrionidae*), жуки-усачи (*Cerambycidae*) (рис. 14d), в том числе дендрофильные виды, развивающиеся в хвойных деревьях – усач сосновый (*Monochamus galloprovincialis*) и многие другие.

Из булавоусых чешуекрылых (*Lepidoptera*, *Rhopalocera*) на тукуланах Махатта и Кысыл-Сыр встречаются нимфалиды (*Nymphalis xanthomelas*), которые в некоторых местах бывают довольно многочисленны (рис. 14f). Кроме того, встречаются другие булавоусые, в том числе *Aporia crataegi* – вид, который в отдельные годы достигает большой численности, а также *Colias papaeno*, *Brenthis ino*, *Clossiana selenis*, *Lopinga deidamia*, *Erebia embla*, *Plebeius argus*, *P. argyrognomon*, *Argiades optilete*, *Cyaniris semiargus* и др., а также занесенные в Красную книгу Якутии *Oeneis ammosovi*, *Pseudophilotes jacuticus* и др. В местах произрастания очитка (*Sedum sp.*) редко встречаются бабочки рода *Parnassius apollo*.

Также многочисленны различные разноусые чешуекрылые (*Heterocera*), среди которых широко представлены представители семейств *Geometridae*, *Noctuidae*, *Sphingidae*, *Tortricidae* а также *Rygalioidea* и другие, относящиеся к чешуекрылым-псаммофилам. Однако в целом, фауна чешуекрылых рассматриваемых тукуланов изучена также недостаточно.

По следам, оставляемым на песках рассматриваемых тукуланов, можно судить о их посещении различными насекомыми, пресмыкающимися, а также птицами и млекопитающими (рис. 15).

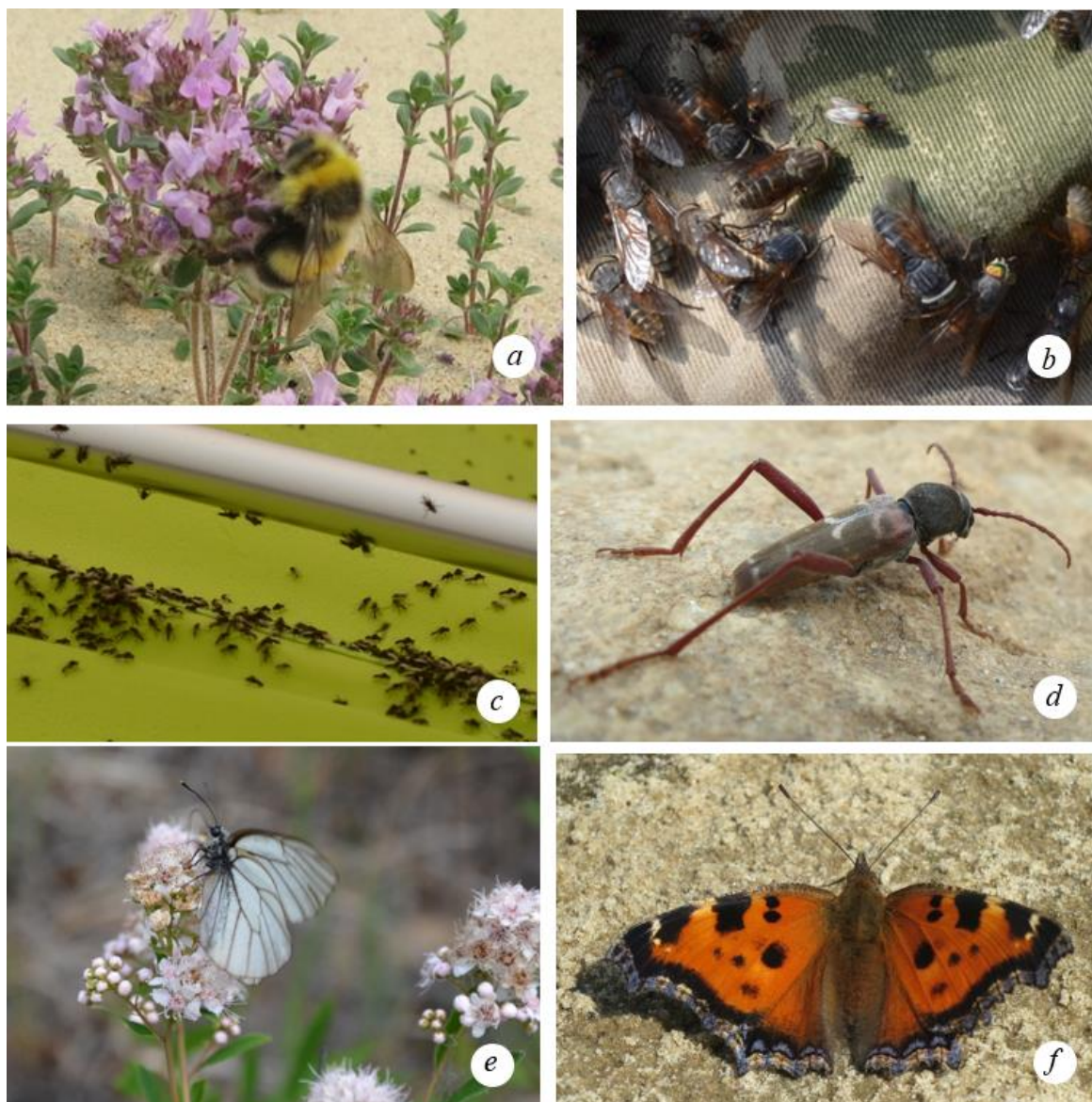


Рис. 14. Насекомые тукуланов Кысыл-Сыр (a–e) и Махатта (f) (фото С. Д. Балыковой)
 a – шмель (*Bombus jonellus*) на тимьяне; b – слепни (*Hybomitra arpadii*, *H. bimaculata* и др.); c – комары и гнус на ткани палатки; d – усач хлорофорус (*Chlorophorus* sp.); e – боярышница (*Aporia crataegi*); f – многоцветница черно-рыжая (*Nymphalis xanthomelas*).

Из птиц изучаемые тукуланы посещают кулики (*Charadrii*), каменки (*Oenanthe* sp.), различные воробьиные (*Passeridae*), а также чайки (*Larus* sp.), нырки (*Netta* sp.) и чирки (*Anas* sp.). Наличие водоплавающих птиц обусловлено близостью реки. Гнездящиеся птицы отмечены лишь в сосняках и эрозионно-болотных понижениях тукуланов.

Из млекопитающих здесь обнаружены следы различных мышеобразных (*Myomorphi*), а также следы белки, бурундука, лисицы и собаки (рис. 15d). Всё это свидетельствует о том, что тукуланы не безжизненные песчаные массивы, а эколого-геологические системы, характеризующиеся специфическими зооценозами с разнообразием животных.



Рис. 15. Следы позвоночных животных на тукуланах Махатта и Кысыл-Сыр
(фото С. Д. Балыковой)

a – следы чайки (*Larus* sp.); *b* – следы куликов (*Charadrii*); *c* – следы воробьиных (*Passeridae*); *d* – следы собаки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ эколого-геологических систем двух исследованных тукуланов позволяет заключить следующее.

1. Эколого-геологические системы тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр представляют собой типичные для Центральной Якутии уникальные природные песчаные образования, абиотические и биотические компоненты которых обладают специфическими особенностями. Выявленные особенности необходимо учитывать в первую очередь при инженерно-экологических исследованиях и инженерно-экологических изысканиях на тукуланах.

2. Песчаные литотопы эколого-геологических систем тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр сформировались за длительные геологические эпохи, они имеют син- и эпикриогенный генезис, отличаются сложным строением, специфическими формами рельефа, а также парагенезом развитых на них современных геологических процессов: золовых, склоновых и криогенных, что находит своё отражение на формировании биотических компонентов данных систем.

3. Особенности биотических компонентов указанных эколого-геологических систем (микробеценозов, фито- и зооценозов) полностью обусловлены климатическими условиями и литотопами, представленными массивами песчаных грунтов.

4. Относительная изолированность тукуланов друг от друга обуславливает формирование на них специфических псаммомикро-, псаммофито- и псаммозооценозов и способствует эндемизму.

Благодарности: авторы благодарят арахнолога доктора биологических наук Ю. М. Марусика за помощь в определении паукообразных, а также коллег по экспедициям – студентов кафедры инженерной и экологической геологии МГУ А. Е. Харламову, А. Д. Кунафина.

Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова «Эколого-геологические системы: структура, многообразие, систематика и их анализ», (раздел 0110 (для тем по госзаданию), номер 5-4-2021, номер ЦИТИС 121042200089-3)

Список литературы

- Балыкова С. Д., Харламова А. Е. Состав и строение песчаных грунтов тукуланов долины Вилюя // Материалы Ежегодной научной конференции «Ломоносовские чтения–2019», секция «Геология». 16–24 апреля 2019. – Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова. – 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://conf.msu.ru/file/event/5604/eid5604_attach_a0f1579058d4bca7e637a2291e0de22150321b13.pdf (просмотрено: 12.03.2023).
- Васильчук Ю. К., Васильчук Д. Ю., Гинзбург А. П. Криогенные почвы в долине реки Вилюй, Якутия // Арктика и Антарктика. – 2021. – № 3. – С. 80–107. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.3.36671
- Галанин А. А., Павлова М. Р., Дьячковский А. П., Павлов Б. А. Феномен тукуланов Центральной Якутии: плейстоценовая криопустыня // Наука и техника в Якутии. – 2015. – № 2 (29). – С. 23–31.
- Галанин А. А., Павлова М. Р., Климова И. В. Позднечетвертичные дюнные образования (дьюлкуминская свита) в Центральной Якутии (часть 1) // Криосфера Земли. – 2018. – Т. XXII, № 6. – С. 3–15.
- Галанин А. А., Павлова М. Р., Шапошников Г. И., Лыткин В. М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа. – 2016. – № 11. – С. 44–55.
- Галанин А. В. Экспедиция на тукуланы (Якутия, среднее течение реки Вилюй). – 2012. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://ukhtoma.ru/expedit24_tukulan.htm (дата обращения 14.01.2023).
- Галанина И. А. Невидимая жизнь в песках тукуланов (Центральная Якутия) // Наука и техника в Якутии. – 2016а. – № 1. С. – 27–33.
- Галанина И. А. Дополнение к лишенобиоте дюнных комплексов (тукуланов) Центральной Якутии // Ботанический журнал. – 2016б. – Т. 101, № 2. – С. 1486–1497.
- Королев В. А., Трофимов В. Т. К построению общей классификации континентальных эколого-геологических систем. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2022. – № 1. – С. 54–61.
- Космоснимок территории нижнего течения реки Вилюй, Якутия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.ru/maps> (дата обращения 10.02.2023).
- Павлова М. Р., Галанина И. А., Галанин А. А. Почвенно-растительный покров эоловых ландшафтов Вилюйского бассейна (Центральная Якутия) // Региональные аспекты изменения природной среды и общества. Материалы XIX научной конференции молодых географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 3 – 7 октября 2017 г.). – Иркутск: Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН. – 2017. – С. 38–40.
- Павлова М. Р., Галанин А. А., Павлов Б. А. Геоморфологические особенности тукуланов долины нижнего течения р. Вилюй // Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике: мат. Всерос. конф. (VII Шукинские чтения). – М.: МАКС Пресс. – 2015. – С. 482–484.
- Павлова М. Р., Рудая Н. А., Галанин А. А., Шапошников Г. И. Строение и динамика развития дюнных массивов Вилюйского бассейна в позднечетвертичное время (на примере тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр // Сибирский экологический журнал. – 2017. – № 4. – 473–486. DOI 10.15372/SEJ20170408.
- Работнов Т. А. Ландшафты песчаных образований в низовьях Вилюя // Землеведение. – 1935. – Т. 37, Вып. 4. – С. 321–338.
- Трофимов В. Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2009, № 2. – С. 48–52.
- Урбан А. А., Галанин А. А., Чжан Т. Р. Литолого-минералогическая характеристика перевеваемого песчаного комплекса «Кызыл-Сырский» // Разведка и охрана недр. – 2013, № 12. – С. 23–27.
- Харламова А. Е., Балыкова С. Д. Сравнительная характеристика состава и строения эоловых песков тукуланов долин рек Лена и Вилюй // Материалы III Общерос. науч.-прак. конф. молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». – М.: Геомаркетинг. – 2019. – С. 38–43.
- Шепелев В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны. – Новосибирск: Изд-во «Гео». – 2011. – 169 с.
- Шепелев В. В. Подземные воды тукуланов Центральной Якутии // Гидрогеологические исследования криолитозоны. – Якутск: ИМ СО АН СССР, 1976. – С. 30–41.

Korolev V. A., Balykova S. D. Ecological and geological systems of Mahatta and Kysyl-Syr tukulans (Yakutia) // *Ekosistemy*. 2023. Iss. 35. P. 82–102.

The article examines the features of the ecological and geological systems of tukulans analysing as an example two similar sand massifs Mahatta and Kysyl-Syr, located in the Vilyui River basin (Central Yakutia). The study is based on the results of the authors' field studies in Central Yakutia and published data. It takes into account the goals and tasks of engineering and environmental researches and surveys. The authors prove that the ecological and geological systems of the Mahatta and Kysyl-Syr tukulans are unique natural sand formations typical for Central Yakutia, the abiotic and biotic components of which have specific features. Sandy lithotopes, the ecological and geological systems of the Mahatta and Kysyl-Syr tukulans have a long history of formation (30–40 thousand years), syn- and epicryogenic genesis, are distinguished by a complex structure, specific relief forms and paragenesis of modern geological processes developed within them: eolian, slope and cryogenic, which is reflected in the biotic components of these systems. Features of the biotic components of these ecological and geological systems (microbocenoses, phyto- and zoocenoses) are entirely determined by climatic conditions and lithotopes, represented by sandy soil massifs. The identified features must be considered first of all in engineering and environmental studies and surveys in tukulans.

Key words: ecosystem, ecological and geological system, tukulan, ecological and geological features, lithotope, edaphotope, microbiocenosis, phytocenosis, zoocenosis, Yakutia.

*Поступила в редакцию 10.04.23
Принята к печати 15.05.23*