

УДК 630*528.9

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАРЕЙ
НА ОСТРОВЕ САХАЛИН© 2004 г. В. И. Харук¹, И. С. Щербинина¹, О. Э. Якубайлик², Э. Касишке³¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
660036 Академгородок, Красноярск² Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036 Академгородок, Красноярск³ University of Maryland, College Park
MD 20742, USA

Поступила в редакцию 04.12.2003 г.

Лесные пожары, гары, орография, ГИС.

Сахалин - горная страна. Главные горные хребты ориентированы субмеридионально. Средняя высота гор 600-700 м (максимальная высота 1609 м). На севере острова расположена обширная Северо-Сахалинская низменность. Типичной особенностью климата является его муссонный характер. Осенне-летние осадки выпадают главным образом с июля по сентябрь, зимние - в феврале и марте. Устойчивый снежный покров наблюдается в течение приблизительно 200 дней в северной части и 150 дней на юге. Количество осадков в северной части острова (400 мм) вдвое меньше, чем в южной (870 мм). Погода сильно изменчива и зависит главным образом от направления ветра. В пожароопасные периоды сильные ветры способствуют быстрому распространению огня. Весна холодная, с поздними снегопадами и туманами, первая часть лета прохладная, вторая - дождливая. Осень относительно длинная и солнечная. Зимой нередки метели с обильными снегопадами. Зима длится около пяти месяцев на юго-западе и до семи на севере. Самый теплый месяц - август, наиболее холодный - январь. Среднегодовая температура -1.4°C на севере и +2.2°C на юге [5].

На территории острова можно выделить следующие подзоны: 1) лиственных лесов (севернее 51°30' с.ш.); 2) темнохвойных лесов с доминированием ели (между 51°30' и 48° с.ш.); 3) темнохвойных лесов с примесью широколиственных пород (к югу от 48° с.ш.).

Пространственная структура лесов усложнена из-за наличия вертикальной поясности и приморских зон. Горные хребты заняты преимущественно темнохвойными лесами. Основные лесобразующие породы - ель (*Picea ajanensis*), лиственница (*Larix kurilensis*), пихта (*Abies sachalinensis*) и береза (*Betula alba*, *B. ermanii*). Высокогорные леса представлены преимущественно кедровым стлаником (*Pinus pumila*). Этот вид представлен также на более равнинной северной части Сахалина, где входит в состав лиственничников либо формирует древостой. Общее число видов растений - 1313, включая 88 эндемиков [3, 11]. Лиственничные леса имеют среднюю полноту в южной и центральной и низкую в северной частях острова. Открытые прибрежные участки покрыты кустарником. В пониженных элементах рельефа, а местами на плоских водоразделах развиваются сфагновые болота с лиственничными редколесьями либо безлесые. Характерная черта растительности подзоны лиственных лесов - широкое распространение частично облесенных олиготрофных болот [11]. На юге и в средней части острова преобладают глинисто-подзолистые почвы, в северной части - песчано-подзолистые [2].

В лесах Сахалина высока вероятность пожаров: приблизительно на половине лесных территорий возможно возник-

новение пожара в течение 0.65-0.75 периода пожароопасности. Субъективными факторами роста лесных пожаров являются труднодоступность территорий для пожарной техники (обилие марей и болот) и низкая обеспеченность лесхозов техникой. Пожары - главная причина ущерба лесов на острове, большинство из них - антропогенного происхождения. В 1945-1995 гг. было зарегистрировано около 4 тыс. лесных пожаров, уничтоживших до 20% лесного фонда [4]. Катастрофические лесные пожары 1989 и 1998 гг. были сконцентрированы главным образом в северной части острова. В сомкнутых древостоях и кедровом стланике наблюдаются верховые пожары; низовые пожары типичны для лиственничных редколесий, вырубок и гарей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Анализ ландшафтной приуроченности гарей основан на материалах лесоустройства и дистанционного зондирования (снимки NOAA/AVHRR), топографических картах и данных наземных обследований. Снимки NOAA/AVHRR использовались для оценки площади гарей, вызванных пожарами 1989 и 1998 гг. Для определения площади гарей и лесов использовались карты лесоинвентаризации 1956, 1973 и 1990 гг. масштаба 1 : 2500000. Наиболее ранняя информация о контурах гарей и лесов была получена с топографической карты 1935 г. масштаба 1 : 500000; на этой карте представлены данные только для северной части острова (к северу от 50-й параллели), поскольку южная часть острова в то время принадлежала Японии. Основой для трехмерного анализа явилась цифровая карта масштаба 1 : 1000000 (<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/topo/globeget.sht>), представляющая матрицу значений высот с 30-секундным разрешением по широте и долготе. Наземные обследования были выполнены экспедицией Института леса СО РАН в 2000 г. в средней и северной частях острова; заложено 82 временных пробных площади. Для каждой пробной площади определены рельеф (высота, азимут, уклон), пройденность пожарами или рубками, тип растительного покрова, состав древостоя, средние диаметр и высота деревьев; описаны возобновление, кустарниковый ярус, напочвенный покров и тип почвы. Координаты центра каждого участка установлены с помощью прибора GPS "Garmin-12" с точностью ±15 м.

Территории гарей оцифрованы по картам 1935, 1956, 1973, 1990 гг. и карте, полученной в результате дешифрирования снимка NOAA/AVHRR (2000 г.). Для этой цели использовалось программное обеспечение GeoDraw для Windows [1] с последующим экспортом в формат шейп-файлов ArcView. Так как исходные карты составлены в различных про-

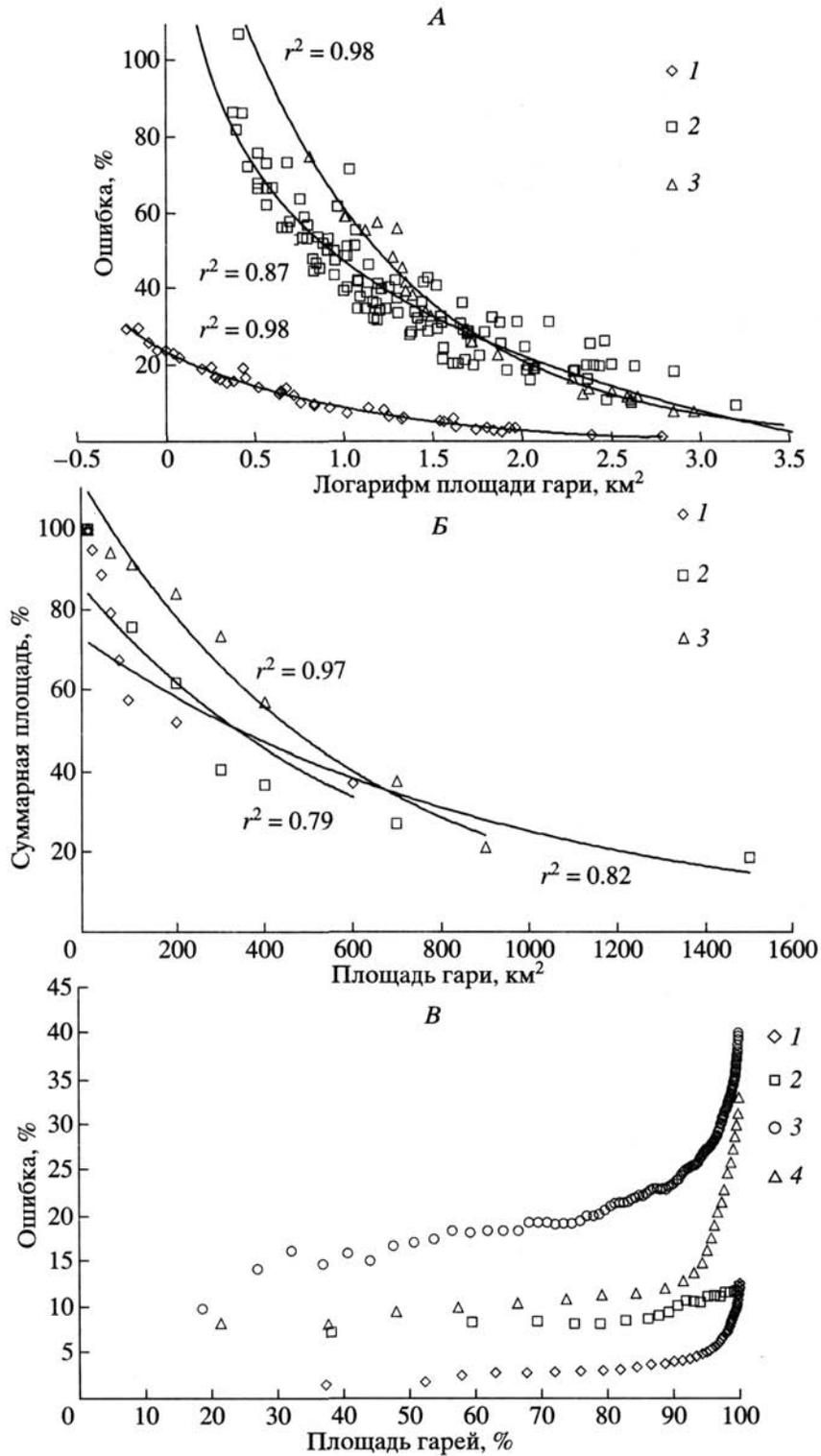


Рис. 1. Оценка ошибок векторизации данных: *A* - зависимость ошибки векторизации от площади гари; *B* - зависимость доли суммарной площади отсортированных полигонов от величины площади, не меньше которой они должны быть; *B* - зависимость среднеарифметической величины ошибки от доли суммарной площади отсортированных полигонов: 1 - 1935 г., 2 - 1956 г., 3 - 1973 г., 4 - 2000 г.

екциях, векторизованные слои с гарями были сначала преобразованы в географическую систему координат. Привязка растровых данных и окончательная сборка проекта осуществлялась в проекции Transverse Mercator (эллипсоид Красовского, центральный меридиан 141°, центральная параллель 53°). Анализ пространственных данных был выполнен в ГИС ArcView 3.1 с модулями расширения ArcView Spatial Analyst 1.1, ArcView 3D Analyst 1.0 и Grid Plus 1.0. В ходе этого анализа выполнялось преобразование слоев с изолиниями рельефа и территориями гарей в TIN-модель (триангуляция Делоне) и далее - построение растровой модели (GRID-тема) с разрешением 0.05 км. В результате стало возможным использовать аппарат картографической алгебры - построение покрытий с экспозицией и уклонами склонов, вычисление пересечений площадей различных покрытий и т.д. Для оценки зависимости распространения гарей от особенностей рельефа был проведен трехмерный анализ на основе цифровой карты масштаба 1 : 1000000. 30-секундное разрешение карты соответствует расстоянию между точками значений высоты для 54-й параллели (север) 546 м по широте и 928 м по долготу. Для 46-й параллели (юг) это составляет 646 м и 926 м, соответственно.

Были сформированы следующие слои: 1) точечный слой рельефа; 2) слой изолиний высот с шагом 50 м; 3) трехмерная модель рельефа; 4) точечный слой значений азимута; 5) точечный слой значений уклонов.

Азимуты рассчитаны со следующим шагом: север (338°-23°), северо-восток (23°-68°), восток (68°-113°), юго-восток (113°-158°), юг (158°-203°), юго-запад (203°-248°), запад (248°-293°) и северо-запад (293°-338°). Градации крутизны склона следующие: (0°-1°), (2°-5°), (6°-10°), (11°-15°), (16°-20°), (21°-25°), (26°-30°) и (30°-45°). Более высокие значения не рассматривались, поскольку предел произрастания лесов на склонах составляет приблизительно 40°. Данные для высоты рассчитывались с шагом 100 м. Поскольку вышеупомянутые категории элементов рельефа (т.е. территории с определенными азимутами, крутизной и высотой) на территории острова представлены неравномерно, то "прямой" анализ взаимосвязи между площадью гарей и элементами рельефа приведет к систематическим ошибкам. Во избежание этого применялась процедура нормирования данных. При этом значения площадей гарей для данной категории (интервалы крутизны, высоты, или азимута) были соотнесены со значением всей области (территории) этой категории в пределах острова. Например, нормировка гарей по азимуту проводилась с использованием коэффициента k_{α} :

$k_{\alpha} = S'_{\alpha} / s_{\alpha}$, где S'_{α} - площадь гарей, ориентированных по данному азимуту, s_{α} - территория с данным азимутом для всего острова. Аналогичные нормирующие коэффициенты рассчитывались для крутизны склонов (k_s) и высоты над уровнем моря (k_h).

Важным методическим аспектом являлась оценка точности вычислений. Ошибка в определении местоположения, линейных размеров, площадей полигонов на цифровых картах и связанная с ней точность картографических вычислений складывается из нескольких составных частей [7, 8]:

1. *Погрешность первоисточника* - бумажной карты, используемой при оцифровке. Погрешность зависит от масштаба карты и определяется параметрами минимального по размерам объекта карты, например, толщиной линии. Принято считать, что точность отображения данных на бумажных картах составляет около 0.4 мм (приближенное значение толщины линии).

2. *Погрешность векторизации*. Она возникает в процессе создания цифровой модели и зависит от используемой компьютерной технологии. Вклад в эту погрешность вносят сканирование, методика оцифровки и математические операции преобразования данных. Использование современных сканеров с разрешением не менее 300 точек на дюйм, прикладных программ типа EasyTrace/GeoDraw и методики оцифровки, в которой векторная линия создается в пределах

пикселей растровой линии, позволяет минимизировать погрешность векторизации (ее величина на порядок меньше погрешности первоисточника).

3. *Погрешность картографической модели*, связанной с преобразованиями пространственных данных. Например, точность цифровой модели рельефа определяется интервалом, через который проведены линии уровня (горизонталы), а точность построения грид-темы в ГИС можно оценить на основе используемого метода интерполяции.

Сканирование исходных бумажных карт производилось с разрешением 300 точек на дюйм. Таким образом, приближенное значение толщины линии контура гарей соответствует для карты масштаба 1 : 2500000 (1956, 1973 гг.) 320 м на местности, для масштаба 1 : 500000 (1935 г.) - 64 м. Карта лесов 1990 г. была оцифрована в Вудсхолл центре, США; за отсутствием соответствующей документации для нее принята средняя точность оцифрованных нами карт. Для снимка NOAA/AVHRR (2000 г.) толщина линии оцифровки составила 500 м.

Как следует из вышесказанного, определяющим фактором в погрешности цифровых карт является погрешность, создаваемая при векторизации карты-первоисточника. Таким образом, задача состояла в оценке точности цифровой модели распределения гарей на анализируемой территории. Ошибка в определении площади полигона составляет величину порядка произведения толщины линии оцифровки на периметр:

$$E = \frac{PL}{S} \times 100\%,$$

где E - ошибка, P - периметр полигона, S - площадь полигона, L - толщина линии.

На рис. 1, *A* приведена зависимость между величиной ошибки и площадью этих полигонов; из нее следует, что при увеличении площади полигона ошибка векторизации снижается. Основной вклад в интегральную ошибку вносят наиболее крупные полигоны. Оценим вклад в ошибку мелких полигонов. Для этой цели полигоны были отсортированы по площади, и затем построена зависимость доли суммарной площади отсортированных полигонов от величины площади, не меньше которой они должны быть (рис. 1, *B*). Например, в 2000 г. гари площадью более 200 км² составляют 85% от территории всех гарей этого года. Конечный итог анализа ошибок - зависимость среднеарифметической величины ошибки от доли суммарной площади отсортированных полигонов - приведен на рис. 1, *B*. Из него следует, что усредненная ошибка зависит в основном от больших полигонов (гарей).

Усредненная ошибка карт определялась как ошибка определения 90% площади гарей (рис. 1, *B*). Она составляет около 4% для карты 1935 г., около 10% - 1956 г., около 23% - 1973 г., около 17% - 1990 г., и около 13% - 2000 г. Эти значения ошибок использовались для построения доверительных интервалов на рис. 5, *A-B*, 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Временная динамика гарей

Временная динамика гарей для всей территории Сахалина, представленная на рис. 2, охватывает период 1935-2000 гг. Первый набор данных получен из статистических материалов, согласно которым катастрофические пожары наблюдались в 1945 г. (800 тыс. га), 1949 (353.9), 1950 (207.0), 1954 (434.6), 1989 (226.7) и 1998 гг. (80 тыс. га) [9]. Второй набор данных был получен в результате анализа карт 1935-1990 гг. и снимка NOAA/AVHRR 2000 г. Следует отметить, что между временем сбора данных и датой публикации карты проходит 2-3 года; поэтому по оси времени данные картирования должны быть смещены влево на упомянутые 2-3 года. Данные на рис. 2 отражают только катастрофические пожары. В период между этими неординарными собы-

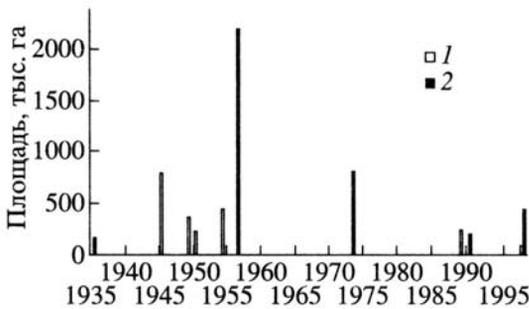


Рис. 2. Временная динамика гарей о. Сахалин: 1 - статистические данные, 2 - данные картографических материалов и материалов спутниковой съемки.

тиями происходят постоянные ежегодные пожары. На рис. 3 представлена динамика гарей Нижне-Гымского лесхоза в 1974-1999 гг. Причины пожаров главным образом антропогенные. Например, в этом лесхозе молния была причиной 7% общего числа случаев, 54% пожаров были антропогенного происхождения, и в 36% происхождение было неизвестно. На рис. 3 представлен "период пожароопасности". Это широко используемый параметр - число дней, в течение которых лесной пожар возможен. Однако не наблюдается корреляции между "периодом пожароопасности" и размером гари ($r = 0.14$).

Проекция гарей на территорию острова, полученные по картографическим материалам за 1935-2000 гг., представлены на рис. 4. За этот период времени гарями было покрыто около 60% территории острова, что примерно в 2.2 раза превышает официальные статистические данные (27%) [9].

Связь гарей с рельефом

Нормированное азимутальное распределение гарей по площади представлено на рис. 5, А. Гари охватывают пре-

имущественно восточные склоны с локальными максимумами на северо-восточных и юго-восточных склонах. Этот факт отражает присутствие двух главных горных хребтов на острове, расположенных вдоль меридиана. На распределение гарей влияет также распределение осадков, выпадающих в летнее время в основном на западных склонах.

Нормированное распределение гарей относительно крутизны склона представлено на рис. 5, Б. Максимальная территория гарей наблюдается в диапазоне $1^\circ \dots 5^\circ$ с дополнительным максимумом в интервале $30^\circ \dots 40^\circ$; последний может быть объяснен возрастанием интенсивности пожара с увеличением крутизны (вследствие образования локальных восходящих потоков воздуха: эффект "трубы"). Известно, что скорость пожара с увеличением крутизны склона быстро растет. Например, "фактор скорости" (т.е. зависимость скорости распространения пожара от крутизны склона), равный 1.0 для склона крутизной 0° , для склона крутизной 15° составляет 1.5, для 30° равен 4.0 и резко увеличивается на склонах с углом крутизны больше 32° [10].

Площадь гарей сильно зависит от высоты; основная часть пожаров наблюдается на высотах ниже 300 м (рис. 5, В). Вторым максимумом наблюдается на высоте 1000-1100 м. Возможно, что это связано с возрастанием процентного соотношения больших углов крутизны на указанных высотах.

Периодичность пожаров

Периодичность пожаров была рассчитана на основе картографических материалов (1935, 1956, 1973 и 1990 гг.) и данных NOAA/AVHRR (2000 г.). При анализе периодичности пожаров было исключено дублирование одних и тех же гарей на последовательных картах (например, гарей, отмеченных на картах 1956 и 1973 гг.). Сравнительный анализ картографических материалов показал, что область "пересечения" гарей составляет 2.8%; соответствующие области были исключены из рассмотрения. Анализ гарей за 65 лет (1935-2000 гг.) показал, что 90.5% территории гарей являются результатом однократного воздействия огнем, 8.6% - двукратного, 0.9% - трехкратного, и 0.03% - четырехкратного (рис. 6). Минимальный период между пожарами составил 9 лет (пожары 1998 и 1989 гг.). В логарифмических координатах зави-

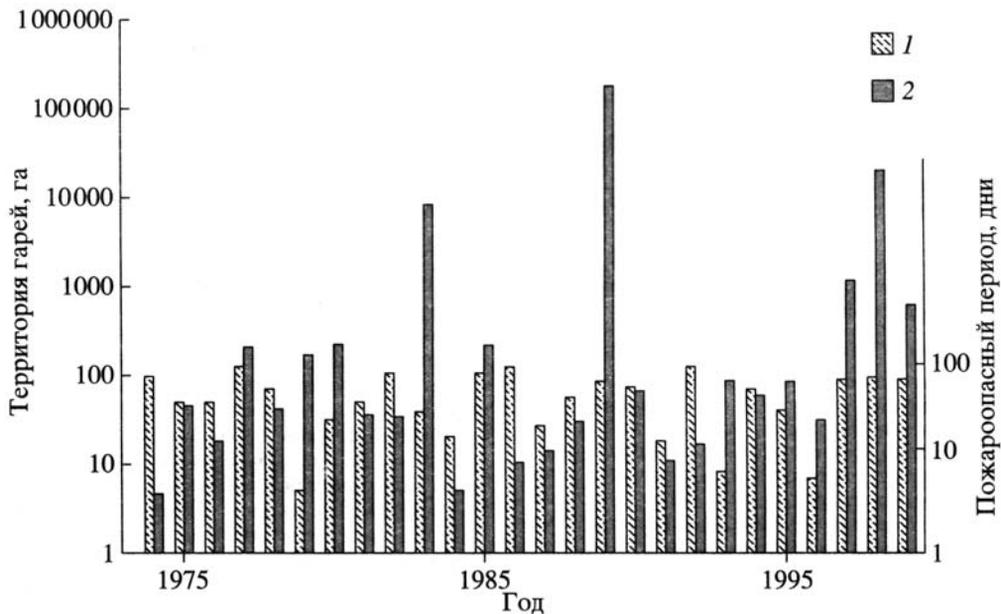


Рис. 3. Временная динамика гарей на территории Нижне-Гымского лесхоза: 1 - площадь гарей, га, 2 - пожароопасный период, дни.

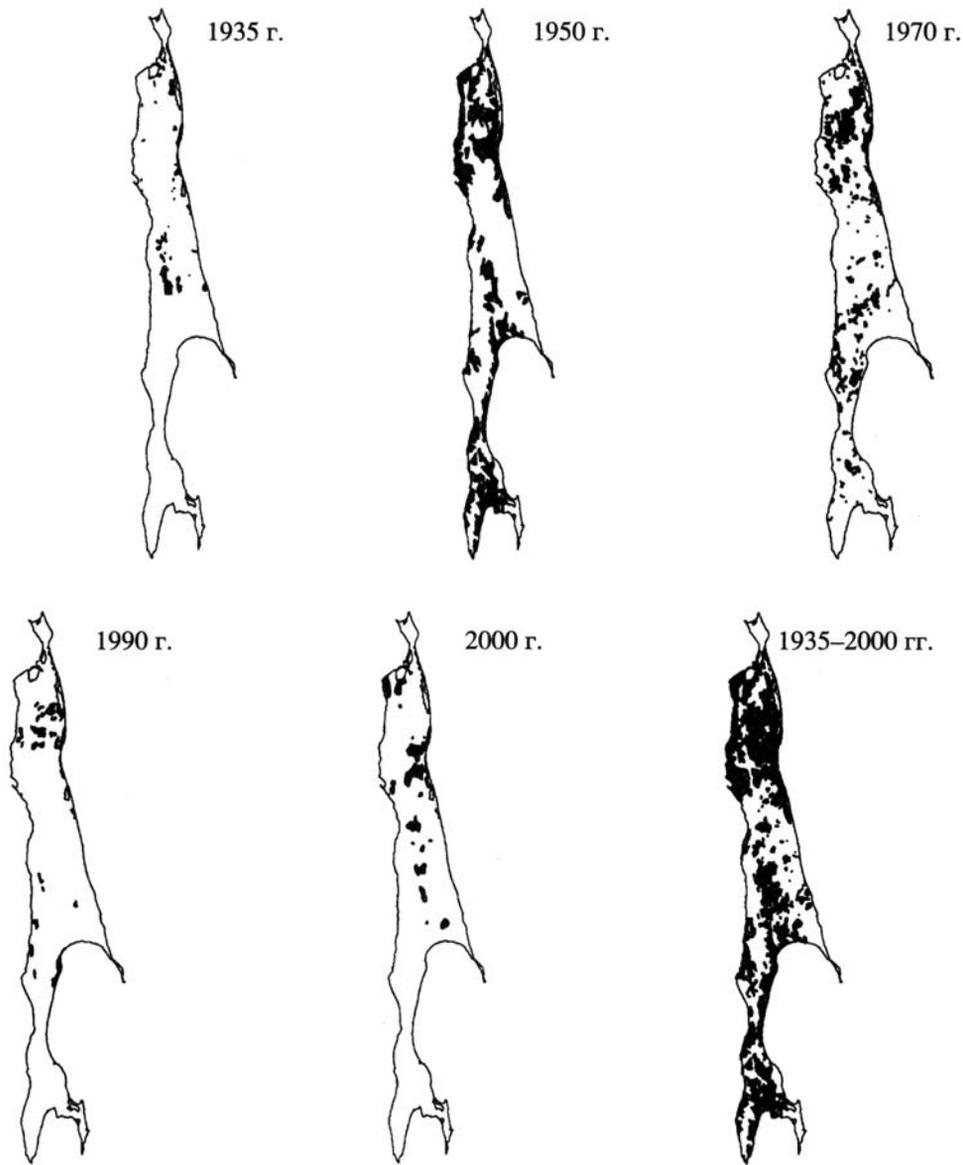


Рис. 4. Площадь гарей на о. Сахалин: 1935, 1950, 1970, 1990 гг. - данные картографических материалов; 2000 г. - материалы спутниковой съемки; 1935–2000 гг. - суммарная площадь.

симость площади гарей от кратности их пройденности пожарами выражается линейной функцией (рис. 6).

Остров Сахалин как объект исследований достаточно велик (76,4 тыс. км²) и "самодостаточен" для выявления общих закономерностей распределения гарей по элементам ландшафта; в то же время его природные условия типичны для Дальнего Востока России. Характеристики рельефа (азимут, крутизна склонов и высота) играют важную роль в возникновении и интенсивности лесных пожаров. Азимут и крутизна значительно влияют на уровень увлажнения территории, так как наветренные склоны получают большее количество осадков, вода не задерживается на крутых склонах, стекая в нижнюю их треть и накапливаясь в пониженных элементах рельефа. От азимута и крутизны склонов зависит также высыхание лесных горючих материалов. С высотой над уровнем моря связан вертикальный климатический градиент, влияющий на пожароопасность. Указанные ландшафтные

характеристики воздействуют на тип лесных горючих материалов, распределение осадков и степень увлажнения территории, а также направление ветров (включая вызванные пожарами). Ранее взаимосвязь пожаров и рельефа местности были сформулированы вербально [5, 12]; в данной работе предложен количественный подход. В континентальной части Сибири пожары наблюдаются главным образом на юго-западных склонах. На Сахалине вследствие орографии острова гари занимают преимущественно юго-восточные и северо-восточные склоны. Предложенная процедура нормирования позволяет анализировать приуроченности гарей к элементам рельефа, поскольку анализируемый элемент территории (с заданными ландшафтными характеристиками) соотносится с пропорцией данного элемента рельефа на всей исследуемой территории. Например, это позволило выявить наличие дополнительного максимума в распределении гарей в зависимости от крутизны склонов (рис. 5, Б), что согласо-

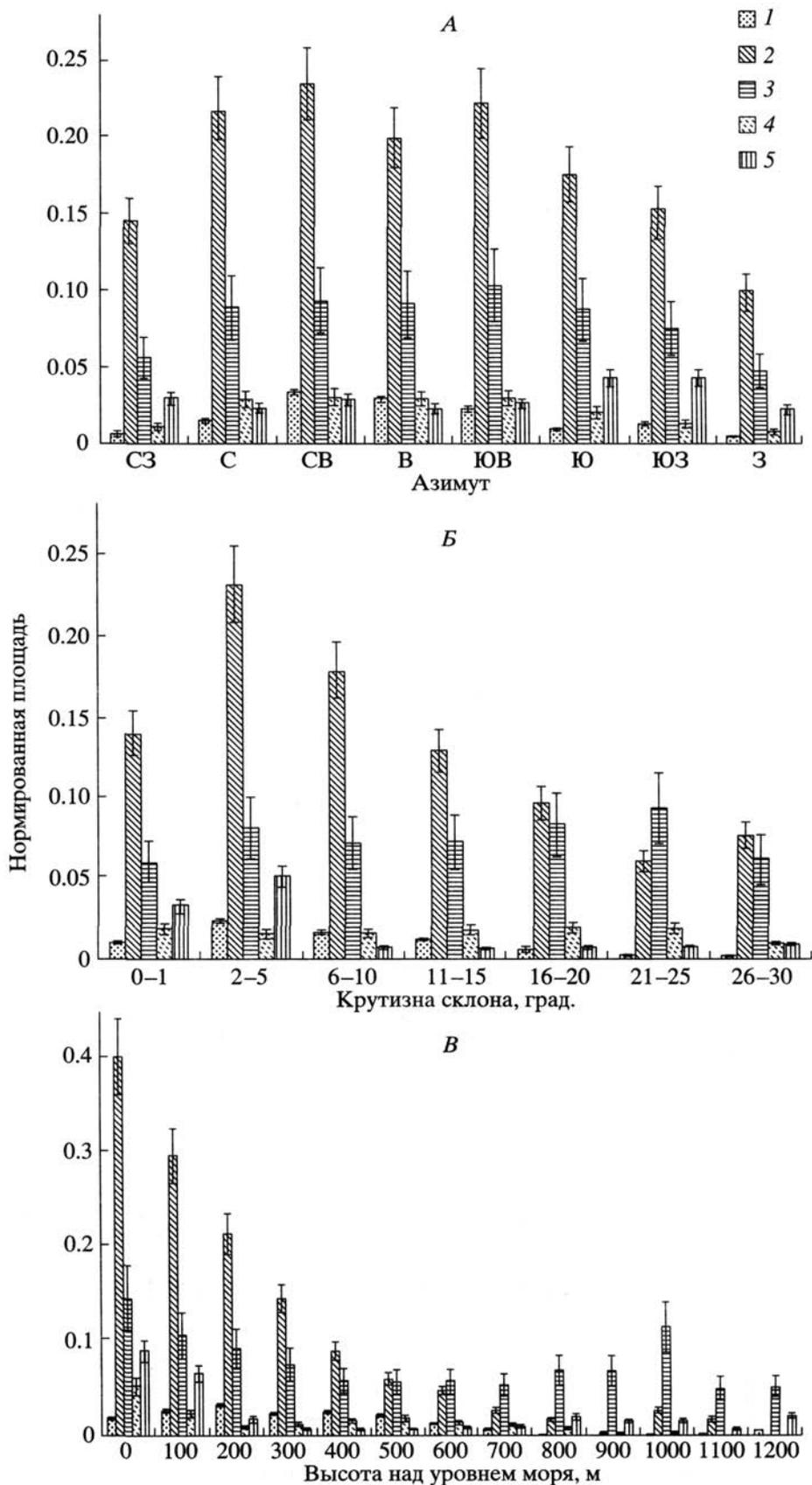


Рис. 5. Зависимость площади гарей от азимута (А), крутизны склона (Б) и высоты над уровнем моря (В): 1 - 1935 г., 2 - 1956 г., 3 - 1973 г.; 4 - 1990 г., 5 - 2000 г. Доверительный интервал на гистограммах соответствует уровню значимости 0.95.

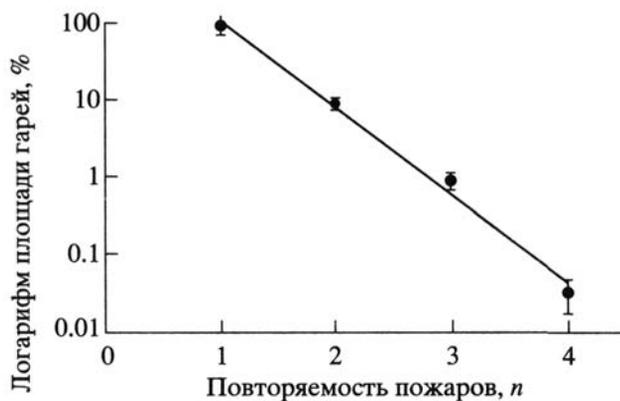


Рис. 6. Распределение площадей гарей в зависимости от числа пожаров на них (n) за 1935-2000 гг. Доверительный интервал соответствует уровню значимости 0.95.

ется с фактом значительного возрастания коэффициента скорости пожара на склонах крутизной свыше 30° [10]. На горных склонах возможны необратимые процессы - образование каменистых осыпей и скальных обнажений. За анализируемый промежуток времени (1935-2000 гг.) гарями было покрыто около 60% территории острова; при этом более 90% гарей обусловлено однократными пожарами. Пройденные пожаром лиственничники постепенно распадаются, накапливая отмершую древесину и создавая условия для повторных лесных пожаров (ответственных за 10% гарей). Эти пожары наносят наибольший экологический ущерб, уничтожая возобновление, выжигая почвенную органику, что может приводить к обезлесению территорий на длительный период. Например, часть гарей, указанных на карте 1935 г., в 2000 г. еще не возобновились.

Выводы. 1. За период с 1935 по 2000 г. гарями было покрыто около 60% территории о. Сахалин.

2. Установлена связь гарей с характеристиками рельефа (высота, азимут, крутизна склонов). Гари охватывают преимущественно восточные склоны с локальными максимумами на северо-востоке и юго-востоке. Относительно крутизны максимальная территория гарей наблюдается в диапазоне углов $1^\circ \dots 5^\circ$. По высоте основная часть гарей расположена ниже 300 м над ур. моря.

3. Из общей площади гарей, образовавшихся за 1935-2000 гг., 90.5% являются результатом однократного пожара, 8.6% гарей пройдены пожарами двукратно, 0.9% гарей - трехкратно и 0.03% - четырехкратно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замай С.С., Якубайлик О.Э.* Программное обеспечение и технологии геоинформационных систем. Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.
2. *Ивлев А.М.* Почвы Сахалина. М.: Наука, 1965. 47 с.
3. *Клинецов А.П.* Защитная роль лесов Сахалина. Южно-Сахалинск: Дальневосточное изд-во, 1973. 232 с.
4. *Корякин В.Н., Романова Н.В.* Лесопользование и лесные пожары как важнейшие взаимозависимые составляющие лесообразовательного процесса на Дальнем Востоке России // Леса и лесообразовательный процесс на Дальнем Востоке. Владивосток: Изд-во РАН, 1999. С. 37-38.
5. *Курбатский Н.П.* Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Наука, 1962. 231 с.
6. Леса СССР. Изд-е 4. М.: Наука, 1965. 768 с.
7. Методические требования по созданию цифровых графических моделей территорий (ЦГМТ) для целей ведения государственного земельного кадастра. Красноярск: Земля, 2002. 88 с.
8. ОСТ 68-3.4-98. Карты цифровые топографические. Требования к качеству цифровых топографических карт. М.: Госгисцентр, 1998. 28 с.
9. *Сабиров Р.Н.* Антропогенная трансформация лесов Сахалина // Леса и лесообразовательный процесс на Дальнем Востоке. Владивосток: Изд-во РАН, 1999. С. 155-156.
10. *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, 1990. 205 с.
11. *Толмачев А.И.* Геоботаническое районирование острова Сахалина. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 134 с.
12. *Фуряев В.Н.* Пожары в лесных формациях. Новосибирск: Наука, 1996. 252 с.

Analysis of Spatial Distribution of Slashes on Sakhalin Island

V. I. Kharuk, I. S. Shcherbinina, O. E. Yakubailik, and E. Kasishke

The dynamics of burned-out areas (1935-2000) on Sakhalin Island was investigated based on cartographic, satellite (NOAA/AVHRR), and terrestrial data. Slash fires formed for the last 65 years occupy 60% of the total area of the island. 90.5% of the burned area resulted from a single fire; 8.6%, from double fires; 0.9% and 0.03% of slashes burned four times. The relations between the area of slashes and relief characteristics (altitude, azimuth, steepness) were determined. The most of burned areas was restricted to an altitude of less than 300 m. Their maximal area was registered on the northeastern and southeastern slopes. The distribution of slashes was maximal on slopes from 1° to 5° and from 30° to 40° .