

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

На правах рукописи

Чурсин Владислав Вячеславович

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЗОН АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ
СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

1.6.18. Науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Кандидат геогр. наук, доцент, Кужевская И.В.

Томск-2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА И ОБУЧЕНИЕ АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ	14
1.1 Общий принцип работы алгоритма детектирования атмосферных явлений	14
1.2 Обучение моделей, входящих в алгоритм детектирования атмосферных явлений.....	17
ГЛАВА 2. ВАЛИДАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ, НА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПК MIRS ПО СИБИРСКОМУ РЕГИОНУ И ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ФГБУ «ЗАПАДНО СИБИРСКОЕ УГМС».....	24
2.1 Оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз по данным штормовых телеграмм в коде WAREP	25
2.2 Оценка достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений по данным ВНИИГМИ МЦД.....	28
2.3 Результаты испытаний по Сибирскому региону	32
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПО МЕТЕОСТАНЦИЯМ ТЕРРИТОРИИ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ФГБУ «ЗАПАДНО СИБИРСКОЕ УГМС».....	38
3.1 Оценка достоверности детектирования вероятных зон ливневых осадков над метеостанцией и в радиусе 50 км по данным фактических наблюдений по станциям региона в коде КН-01 SYNOP	38
3.2 Оценка достоверности детектирования вероятных зон ливневых осадков над метеостанцией и в радиусе 50 км по данным фактических наблюдений по станциям региона в коде КН-01 SYNOP	42
3.3 Оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз с вероятностью >80% над метеостанцией по данным фактических наблюдений по станциям региона в коде WAREP	45
Приложение 1	48
Приложение 2	63
Приложение 3	64

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Согласно статистическим данным, в России 40% всех случаев опасных метеорологических явлений приходится на опасные явления (ОЯ), связанные с зонами образования активной конвекции. Основные трудности своевременного прогнозирования конвективной облачности и связанных с ней опасных метеорологических явлений обусловлены большой пространственной и временной изменчивостью облачности и сложностью усвоения информации о ее физических характеристиках в прогностических региональных мезомасштабных моделях.

Качественный прогноз невозможен без, как можно более точного, диагноза ряда физических характеристик облачности и вертикального строения тропосферы. В этом случае, кроме стандартных методов, которые использует синоптик при составлении прогноза, необходима дополнительная информация метеорологических радиолокаторов, спутников или продуктов численного прогноза погоды (ЧПП) регионального масштаба.

В России, на сегодняшний день, действуют несколько систем космического мониторинга опасных гидрометеорологических явлений как на федеральном уровне, так и в отдельных регионах. На основе их применения обнаруживаются признаки возникновения чрезвычайных ситуаций, ведется их мониторинг, оценивается ущерб.

В последнее время исследования конвективных явлений были сосредоточены на использовании машинного обучения (machine learning (ML)) для синтеза больших объемов атмосферных данных, уменьшая количество контролируемых данных при производстве квалифицированных прогностических продуктов без явных предположений прогнозирования. Вместо явного предсказания, модели ML переопределяют набор входных данных на заданный выход путем оптимизации структуры модели, так что различия между предсказаниями ML и выходными наблюдениями, или «истинными значениями» минимизируются. Исследования по

прогнозированию града на основе машинного обучения в США показали, что прогнозы ML демонстрируют большую оправдываемость по сравнению с прямым прогнозом града на основе вывода модели ЧПП или использования прокси-переменных.

Исследования возможности использования спутникового микроволнового зондирования для восстановления вертикальных профилей метеовеличин и разработка алгоритмов машинного обучения только набирают популярность. Спутниковое зондирование не используют как дополнительный/альтернативный источник аэрологической информации в виду его малой изученности для территории России, а тем более севера Западной Сибири.

Цель исследования – выявить генеральную устойчивую архитектуру алгоритма детектирования атмосферных явлений с возможности периодической корректировки весовых коэффициентов в узлах алгоритма.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методик детектирования метеорологических явлений.
2. Составление массива данных о локализации и времени событий атмосферных явлений, наблюдавшихся в основные метеорологические сроки по 134 метеорологическим станциям Западной Сибири из открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД в период с 1990 по 2021 гг.
3. Сбор массива температурно-влажностных характеристик атмосферы и индексов неустойчивости по данным реанализа ERA5 в дни с атмосферными явлениями.
4. Составление массива данных спутникового зондирования программного комплекса MIRS над территорией Западной Сибири в дни атмосферными явлениями.
5. Разработка архитектуры алгоритма детектирования атмосферных явлений основанного на технологиях машинного обучения и нейронных сетях.
6. Создания и обучение, на данных реанализа ERA5, алгоритмов для детектирования гроз и ливневых осадков.

5. Верификация полученных алгоритмов и моделей на данных спутникового зондирования программного комплекса MIRS.

6. Программная реализация расчета и отображения результатов детектирования атмосферных явлений.

Объект исследования – слой тропосферы на территории Сибири.

Предметом исследования являются вертикальные профили температуры и влагосодержания при различных атмосферных явлениях.

Научная новизна

1. Проведена оценка точности восстановления метеорологических параметров по высотам для территории Сибири, полученных с помощью дистанционного зондирования на основе данных реанализа ERA5, принятыми за эталон.

2. Разработана и адаптирована к спутниковым данным архитектура алгоритма детектирования атмосферных явлений на территории Сибири, основанная на технологиях машинного обучения и нейронных сетях.

3. Впервые получены удовлетворительные результаты распознавания зон атмосферных явлений в высоких широтах Сибирского сектора.

4. Разработан алгоритм корректировки спутниковых данных в зависимости от определяемых атмосферных искажений на базе предобученных нейронных сетей.

Практическая значимость работы

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от «09» декабря 2021 г. № 01-11610/21и разработанная автором технология выделения вероятных зон гроз и атмосферных осадков различной интенсивности в летний период года для территории Сибири по данным спутникового зондирования была внедрена в оперативную работу СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» с 15.11.2021 г. ЦМКП Росгидромета рекомендовано к использованию в оперативно-

прогностических подразделениях ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» информационную продукцию технологии выделения вероятных зон гроз и атмосферных осадков различной интенсивности в летний период года для территории Сибири по данным спутникового зондирования в качестве вспомогательной при подготовке прогнозов погоды, начиная с 2022 г.

Материалы и методы исследования:

Технология выделения вероятных зон атмосферных явлений по данным спутникового зондирования представляет собой модель вероятностного детектирования наличия или отсутствия атмосферного явления. С помощью расчетов выделяются зоны, в которых параметры атмосферы в большей или меньшей степени соответствуют условиям, при которых может сформироваться гидрометеорологическое явление. Расчеты осуществляются с помощью технологии машинного обучения и нейронных сетей.

Наземные данные. За эталонные данные о фактическом наблюдении атмосферных явлений на станции, на этапе валидации нейронной сети, была принята информация из штормовых телеграмм в коде WAREP, предоставленная ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», за период май-октябрь 2021 года. Обучения нейронной сети и тестирование проводилась на основе информации из открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД, содержащей данные о типах атмосферных явлений, их интенсивности и времени начала/окончания, за май – октябрь 1990 – 2020 гг..

Данные реанализа ERA5. ERA5 производятся ECMWF и предоставляют почасовые данные о параметрах поверхности суши, моря и атмосферы (для 37 уровней давления, от подстилающей поверхности до 80 км) с 1979 года по настоящее время. Пространственное разрешение – $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. ERA5 является результатом ассимиляции данных 4D-Var в CY41R2 интегрированной прогнозной системе ECMWF (IFS), которая усваивает данные наземной наблюдательной сети и данные аэрологического зондирования. Использовались данные о вертикальном распределении температуры и влажности. На их основе рассчитывались вертикальные профили температуры точки росы, относительной влажности,

дефицита точки росы и значения индексов неустойчивости (Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals, K-индекс и высоты нижней границы конвективной облачности).

Данные наземных наблюдений (135 метеорологических станций) и реанализа были совмещены в пространстве и времени. Для этого использовалась разница во времени наблюдений не более 5 минут, а профили метеопараметров строились по ближайшему к метеорологической станции узлу сетки. Использовались данные за мая по октябрь 1990 – 2018 гг.

Данные программного комплекса(ПК) MIRS. ПК MIRS разработан Центром спутниковых приложений и исследований NOAA / NESDIS (STAR). Входными данными, используемыми для обработки в ПК MIRS, являются микроволновые измерения приборов AMSU/MHS КА серии NOAA, MetOp и прибора ATMS КА Suomi NPP. Для расчета параметров атмосферы и подстилающей поверхности ПК MIRS использует физически обоснованную модель восстановления метеорологических характеристик 1DVAR. Продукты программного комплекса зарекомендовали себя в мировой практике в качестве достоверного источника данных о распределении метеопараметров по высотам. Точности восстановления метеопараметров соответствуют рекомендованным ВМО, разработчиками проводится ежедневная оценка качества данных. Данные наземных наблюдений (135 метеорологических станций) и спутникового зондирования были совмещены в пространстве и времени. Для этого использовалась разница во времени наблюдений не более 15 минут, а профили метеопараметров строились по ближайшему к метеорологической станции узлу зондирования. Использовались данные за мая -октябрь 2019 – 2020 гг.

Нейронная сеть. По структуре связей нейронных сетей в работе использована полносвязная нейронная сеть, где выходной сигнал каждого нейрона подается в качестве входного сигнала всем последующим нейронам. Выходными сигналами сети могут быть все или некоторые выходные сигналы нейронов. В исследовании использовалась открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google-TensorFlow, дополненная нейросетевой библиотекой KERAS. Модель нейронной сети принимает на вход

значения параметров атмосферы и рассчитанных индексов неустойчивости. Архитектура разработанной авторами нейронной сети выглядит следующим образом - сорок входных нейронов, функция активации на скрытых слоях – Rectified linear unit (ReLU), функция активации на выходном слое – Softmax. После попадания параметров на слой входных нейронов случайным образом отключается 20 % для того, чтобы избежать переобучение модели. Далее данные поступают на еще один слой с функции активации ReLU, но с меньшим количеством нейронов - 20. После этого происходит нормализация, то есть нормируются выходы предыдущих слоев, после чего также отключается 20 % случайных нейронов в слое. Затем данные поступают еще на один скрытый слой содержащий 15 нейронов, после чего происходит передача уже модифицированных данных на выходной слой содержащий 2 нейрона соответствующих необходимой классификации - наличие/отсутствие атмосферного явления. На выходном слое функцией активации является Softmax. Это позволяет на выходе получить процент вероятности соответствия метеорологических параметров тем, при которых наблюдаются атмосферные явления. Функцией оптимизации для нейронной сети выступает NAdam, т.к. при применении функции Adam результаты были несколько хуже. Коэффициент скорости обучения (learning rate) нейронной сети составил 0.003 на обучении.

Метрики точности. В соответствии с Методическими указаниями по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов (РД 52.27.284–91), для установления надежности расчетных методов прогноза такого метеорологического явления как гроза и ливневые осадки, первоначально составляется таблица сопряженности прогноза с фактическими данными о явлениях по форме 9. На основании этих данных рассчитываются оправдываемости в процентах прогнозов наличия (Уя) и отсутствия (Уб.я) явления. Для характеристики успешности метода прогнозов с учетом случайных прогнозов рассчитывается критерий надежности Н.А. Багрова (Н). Установлено, что прогнозы с $H < 0,33$ являются ненадежными. Для оценки качества альтернативных прогнозов

также применен критерий качества прогнозов Пирси-Обухова (Т). Положительные значения Т свидетельствуют о том, что предупрежденность явления (Пя) превышает отношение ошибочных прогнозов явления к фактическому числу дней без явления. При идеальном прогнозе $T=1$.

Дополнительные оценки качества:

- U общая оправдываемость, %;
- $(U_{\text{я}} + P_{\text{я}})$ суммарный показатель, характеризующий удовлетворительное качество прогнозов при условии $(U_{\text{я}} + P_{\text{я}}) > 130\%$.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование модели бинарной классификации как дополнительного элемента при построении модели детектирования атмосферных явлений улучшает качество обнаружения явления не менее чем на 10%.

2. Разработанные алгоритмы предварительной коррекции спутниковых данных вертикального разрешения позволяют уменьшить значения ошибки восстановления метеовеличин не менее чем на 38 %.

3. Применение разработанного алгоритма для спутниковых данных позволяет детектировать зоны атмосферных явлений при адвективных процессах с точностью от 71% и до 85% при конвективных.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: V Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» и I молодежная школа «Проблемы военно-прикладной геофизики, радиолокационного и аэрокосмического зондирования природной среды» (Санкт-Петербург, 2018); Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2018); XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2019); Международная научно-практическая

конференция, посвященная 100-летию Ю.И. ЧИРКОВА (Москва, 2019); XXVI Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (Казань, 2019); Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2020); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Цифровая география» (Пермь, 2020).

Результаты диссертационной работы докладывались на технических совещаниях в ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» (Новосибирск, 2020, 2021).

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждается их сравнением с независимыми данными и исследованиями других авторов, а также публикациями в рецензируемых периодических изданиях, широким обсуждением на различных (российских и международных) конференциях и семинарах.

Личный вклад.

1. Автором проведен анализ существующих методик детектирования опасных конвективных метеорологических явлений.
2. Основная роль в разработке технологии выделения вероятных зон гроз и атмосферных осадков различной интенсивности для территории Сибири по данным спутникового зондирования.
3. Основная роль в работах по программной реализации полученных технологий для оперативной обработки спутниковых данных вместе с соавторами статей, лежащих в основе работы.
4. Основная роль в разработке методик валидации технологии выделения вероятных зон гроз и атмосферных осадков различной интенсивности для территории Сибири по данным спутникового зондирования и проведении её на независимых данных.

5. Участие в подготовке и написании научных статей, в подготовке и представлении докладов на научных конференциях и семинарах.

Публикации.

Публикации, индексируемые в базе данных «Scopus», «WoS» и ВАК РФ:

1. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири / В.П. Горбатенко, И.В. Кужевская, К.Н. Пустовалов [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 5. – С. 108-117.

2. Анализ проявления экстремальности климата с середины XX в. на территории Горного Алтая / И. В. Кужевская, О. Е. Нечепуренко, В. В. Чурсин, М. Хироши // Геосферные исследования. – 2020. – № 3. – С. 97-108. – DOI 10.17223/25421379/16/8.

3. Детерминирование зон обледенения воздушных судов на юго-востоке Западной Сибири / М. А. Волкова, И. В. Кужевская, Н. К. Барашкова [и др.] // Геосферные исследования. – 2021. – № 4. – С. 94-102. – DOI 10.17223/25421379/21/8.

4. Pilot studies of the unique highland palsa mire in western sayan (Tuva republic, Russian federation) / S. N. Kirpotin, Z. N. Kvasnikova, S. A. Potapova [et al.] // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13. – No 1. – DOI 10.3390/atmos13010032.

5. Случай зимней конвекции по данным ATOVS / Д. А. Жохова, И. В. Кужевская, К. Н. Пустовалов, В. В. Чурсин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2018. – № 662. – С. 211-214.

Публикации в сборниках конференций:

1. Детектирование гроз на основе микроволнового зондирования с помощью алгоритмов машинного обучения / И. В. Кужевская, В. В. Чурсин // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы : доклады конференции, Нальчик, 08–10 сентября 2021 года. – Нальчик: Издательство "Принт Центр", 2021. – С. 186-187.

2. Мезомасштабные конвективные комплексы Западной Сибири / И. В. Кужевская, В. А. Жукова, Т. С. Кошикова [и др.] // Цифровая география : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т., Пермь, 16–18 сентября 2020 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – С. 394-397.

3. Детектирование грозových ячеек по данным спутникового зондирования / В. В. Чурсин, И. В. Кужевская // Цифровая география : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т., Пермь, 16–18 сентября 2020 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – С. 455-458.

4. Оценка условий формирования градовых процессов на юго-востоке Западной Сибири / О. Е. Нечепуренко, М. А. Волкова, В. П. Горбатенко [и др.] // CITES '2019 : Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, Москва, 27 мая – 06 2019 года. – Москва: Томский центр научно-технической информации, 2019. – С. 103-107

5. Формирование опасных метеорологических явлений при местном циклогенезе Западной Сибири / М. А. Волкова, Е. Л. Тунаев, И. В. Кужевская, В. В. Чурсин // Системы контроля окружающей среды - 2019 : Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, Севастополь, 12–13 сентября 2019 года. – Севастополь: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Институт природно-технических систем”, 2019. – С. 133.

6. Методика распознавания зон сильных осадков на основе спутниковых данных / И. В. Кужевская, В. В. Чурсин // Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : Тезисы докладов российской конференции, Томск, 15–19 октября 2019 года / Под редакцией М. В. Кабанова. – Томск: Аграф-Пресс, 2019. – С. 64-65.

7. A study of hailstorms in the South of Western Siberia / I. Kuzhevskaja, M. Volkova, O. Nechepurenko, V. Chursin // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering : International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" - Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area, Kislovodsk, 01–05 октября 2019 года. – Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 044036. – DOI 10.1088/1757-899X/698/4/044036

8. Особенности вертикального и горизонтального градиентов температуры воздуха в дни местного циклогенеза / Д. А. Жохова, И. В. Кужевская, В. В. Чурсин // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы V Международной научной конференции, Красноярск, 11–14 сентября 2018 года / Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. – С. 306-310.

9. Мезомасштабные циклоны Западной Сибири, их классификация и возможность обнаружения с помощью искусственного интеллекта / В. В. Чурсин, И. В. Кужевская // Распространение радиоволн : Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах, Казань, 01–06 июля 2019 года. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019.

ГЛАВА 1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА И ОБУЧЕНИЕ АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

1.1 Общий принцип работы алгоритма детектирования атмосферных явлений

Разрабатываемый алгоритм не является численным прогнозом погоды, а представляет собой модель вероятностного детектирования наличия или отсутствия атмосферного явления. С помощью расчетов выделяются зоны, в которых параметры атмосферы в большей или меньшей степени соответствуют условиям, при которых может сформироваться гидрометеорологическое явление, это позволяет синоптику отмечать территории где потенциально возможны ливневые осадки, гроза. Результатом расчета является карта максимально вероятных атмосферных явлений и карты вероятных зон развития гроз. Пример визуализации расчетов представлен на рисунках 1 и 2.

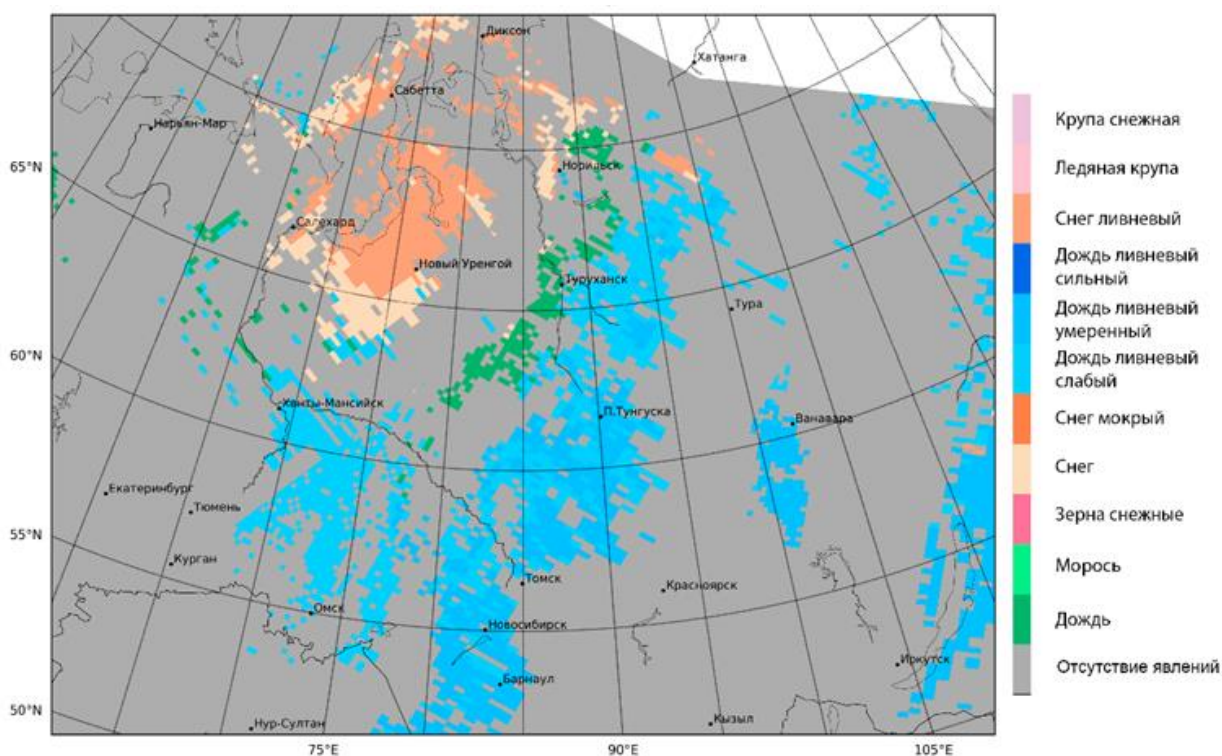


Рисунок 1. – Пример карты вероятных атмосферных явлений за 25.05.2019 г.

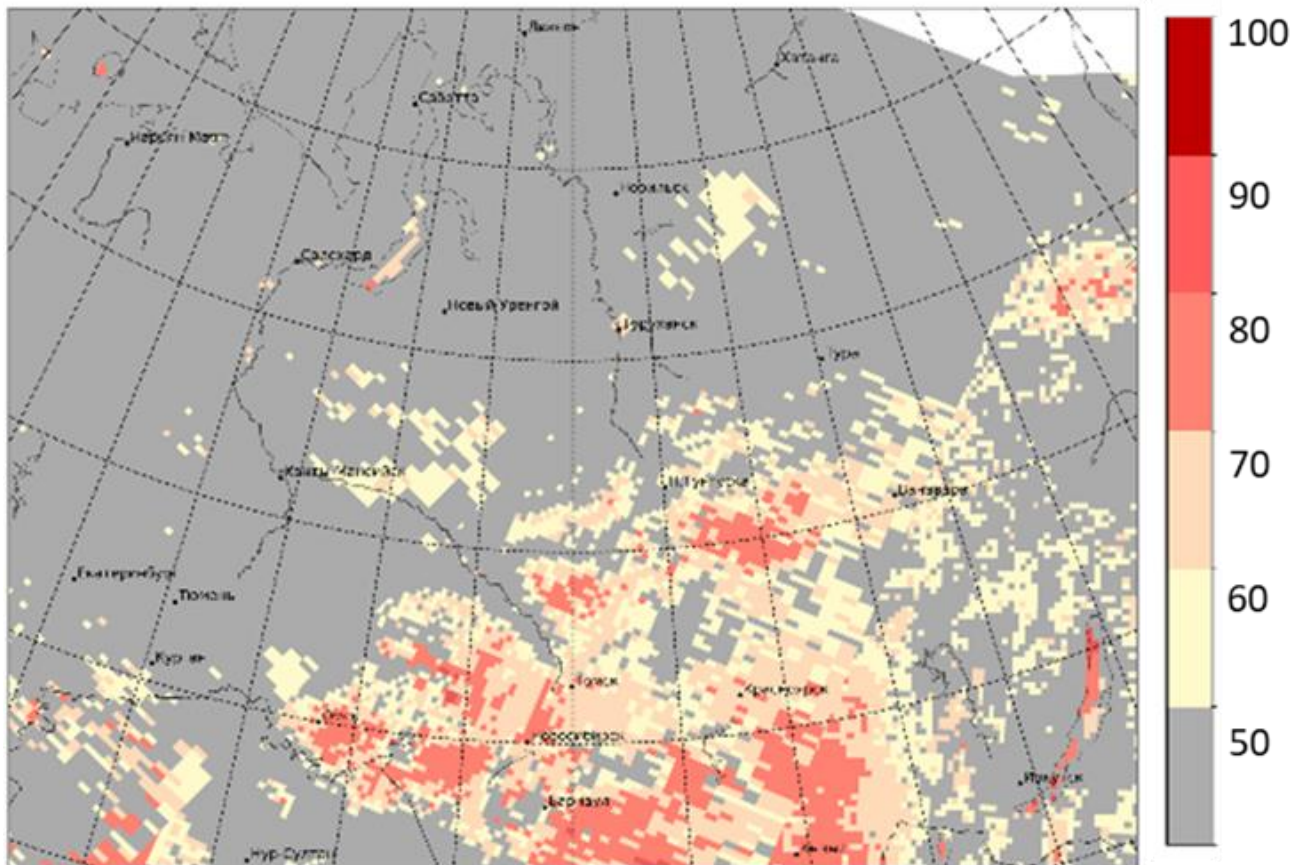


Рисунок 2. – Пример карты вероятных зон развития гроз за 26.05.2020 г.

Процедура построения карт вероятных атмосферных явлений включает в себя несколько этапов:

1. Сибирским центром НИЦ Планета принимается информация полярно-орбитальных космических аппаратов серии NOAA, MetOp и SUOMI-NPP, суммарно от 12 до 15 композитных сцен за день.

2. В специализированном программном комплексе MIRS производится восстановление вертикальных профилей метеопараметров. Продукты программного комплекса зарекомендовали себя в мировой практике в качестве достоверного источника данных о распределении метеопараметров по высотам. Точности восстановления метеопараметров соответствуют рекомендованным ВМО, разработчиками проводится ежедневная оценка качества данных.

3. Коррекция вертикальных профилей температуры и удельного влагосодержания. Для этого используется авторский алгоритм коррекции в основе

которого лежат 12 обученных нейронных сетей прямого распространения. Скорректированные вертикальные профили температуры и удельного влагосодержания, а также рассчитанные на их основе вертикальные профили температуры точки росы, относительной влажности, дефицита точки росы, значения индексов неустойчивости (Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals и K-индекс) являются входными данными для следующего этапа.

4. Расчеты основного модуля алгоритма, где происходит принятие решения о наличии или отсутствии атмосферных явлений в каждом пикселе спутникового снимка. Реализация этого этапа производится с использованием современных и эффективных библиотек машинного обучения и построения нейронных сетей, реализованных на языке программирования Python. Ключевой является открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google-TensorFlow, дополненная нейросетевой библиотекой KERAS, а также одной из самых эффективных реализаций алгоритма градиентного бустинга на деревьях решений – XGBoost. Основной модуль методики включает в себя три уровня:

4.1 Бинарная классификация характеристик атмосферы на предмет принадлежности различным атмосферным явлениям. За реализацию этого этапа отвечают математические модели деревьев решений построенные и обученные при помощи алгоритма градиентного бустинга.

4.2 Проверка принадлежности характеристик атмосферы одному из трех классов (осадки ливневого характера, осадки обложные, остальные явления). За реализацию этого этапа отвечает обученная полносвязная нейронная сеть прямого распространения.

4.3 Мультиклассификационная нейронная сеть прямого распространения, которая в качестве предикторов использует характеристики атмосферы и результаты классификации предыдущих этапов в каждом пикселе снимка.

После прохождения всех этапов каждому пикселю присваивается наиболее вероятное атмосферное явление.

5. Отрисовка полученных результатов в виде карт.

1.2 Обучение моделей, входящих в алгоритм детектирования атмосферных явлений

Обучение модели - это процесс, в котором параметры самой математической модели настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта модель встроена. Тип обучения определяется способом подстройки параметров.

При реализации представляемого алгоритма был использован метод «обучение с учителем». Процесс обучения с учителем представляет собой предъявление модели выборки эталонных обучающих примеров. Каждый образец подается на входы, затем проходит обработку внутри структуры, вычисляется выходной сигнал, который сравнивается с соответствующим значением целевого вектора, представляющего собой требуемый выход модели. Векторы обучающего множества предъявляются последовательно, вычисляются ошибки и веса подстраиваются для каждого вектора до тех пор, пока ошибка по всему обучающему массиву не достигнет приемлемо низкого уровня.

От выборки, на основе которой проходит обучение напрямую зависит конечная точность модели. За эталонные данные были приняты:

1. Данные ERA5 - это новейший реанализ климата, произведенный ECMWF, предоставляющий ежечасные данные по параметрам атмосферы, поверхности суши и состояния моря вместе с оценками неопределенности. Данные ERA5 доступны по 37 уровням давления начиная с 1979 года по настоящее время и имеют периодичность в один час, при пространственном разрешении $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. ERA5 является результатом ассимиляции данных 4D-Var в CY41R2 интегрированной прогнозной системе ECMWF (IFS), которая в свою очередь включает в себя данные наземной наблюдательной сети и данные аэрологического зондирования.

2. Данные наземной наблюдательной. Записи об атмосферных явлениях и времени их начала и окончания, на 135 метеорологических станциях Сибири в период май-октябрь 1990-2018 гг. (рисунок 3)

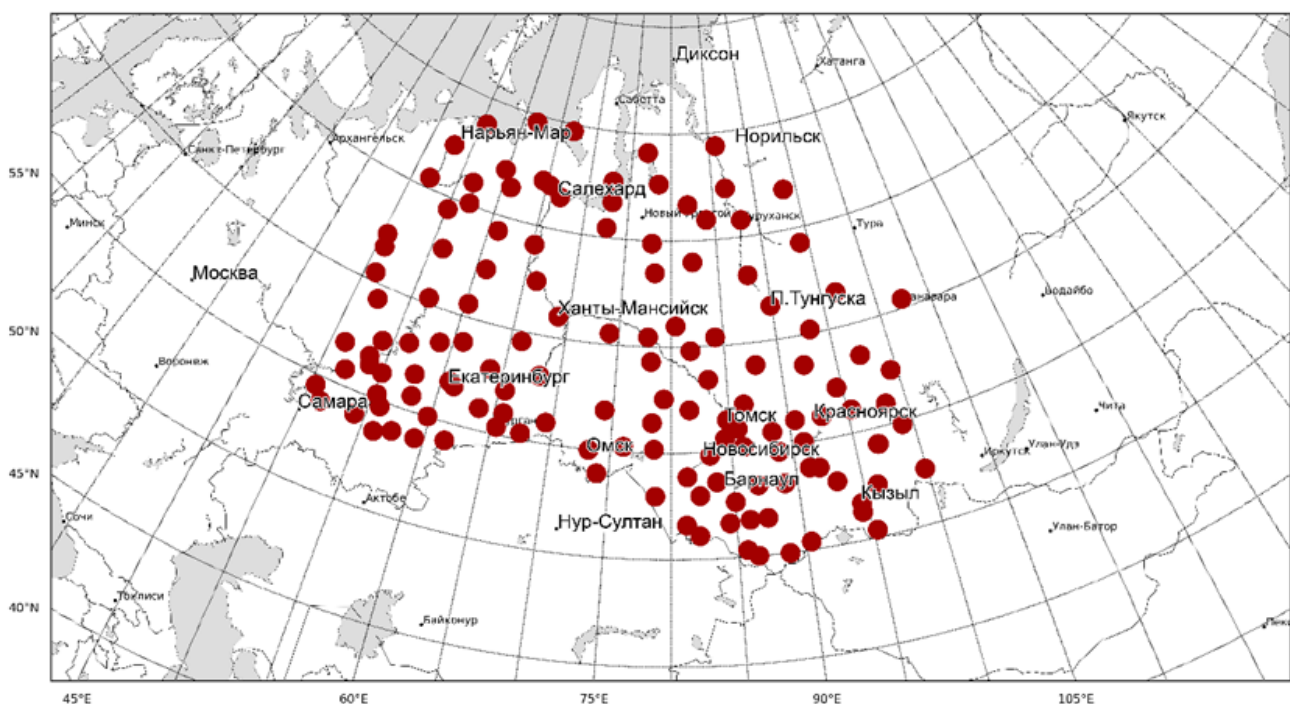


Рисунок 3. – Пространственное распределение используемых метеорологических станций.

Данные наземных наблюдений и реанализа совмещались в пространстве и времени. Использовалась разница во времени не более 5 минут, а профили метеопараметров строились по ближайшему узлу сетки. Итоговый массив содержал в себе данные о метеорологических явлениях и сопутствующие им значения характеристик атмосферы (вертикальный профиль температуры, удельного влагосодержания, относительной влажности, температуры точки росы, дефицита точки росы, индексы Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals, К-индекс, а также значения давления на уровне станции и высота нижней границы конвективной облачности). Общий объем массива составляет 1 325 245 записей.

Для реализации обучения и тестирования математических моделей массив данных был случайным образом разделен на обучающий и тестовый в соотношении 70% на 30% с сохранением количественного распределения явлений. Схематично процедура обучения приведена на рисунке 4.



Рисунок 4. - Схема процедуры обучения.

Обучение каждой модели производилось путем подбора весовых коэффициентов до момента пока значения точности на тестовой выборке не перестают увеличиваться на протяжении 10 последовательных проходов всего массива данных.

После обучения достоверность всех полученных моделей оценивалась на тестовой выборке, где полученные расчеты сравнивались с эталонными данными.

Получены следующие значения точности (Рисунок 5):

1. Модель бинарной классификации - 72,1/72,3% (обучающая/тестовая);
2. Модель классификации на 3 группы - 75,0/74,0% (обучающая/тестовая);
3. Мультиклассификационная нейронная сеть присвоения атмосферного явления - 82,1/81,8% (обучающая/тестовая).

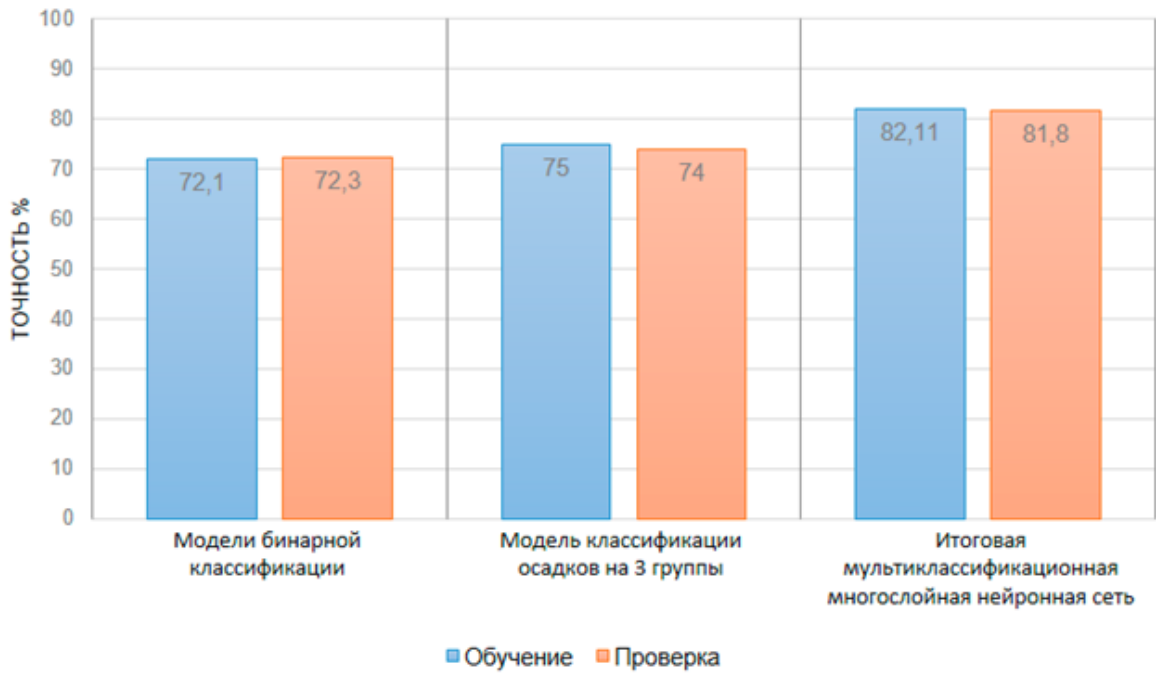


Рисунок 5. - Результирующая точность уровней обработки для обучающей и тестовой выборки.

Таким образом, предложенный подход использования результатов бинарной классификации и классификации на 3 группы в качестве дополнительных предикторов позволяет увеличить точность детектирования атмосферных явлений в среднем на 10 %. Результирующая архитектура алгоритма детектирования атмосферных явлений представлена на рисунке 6.

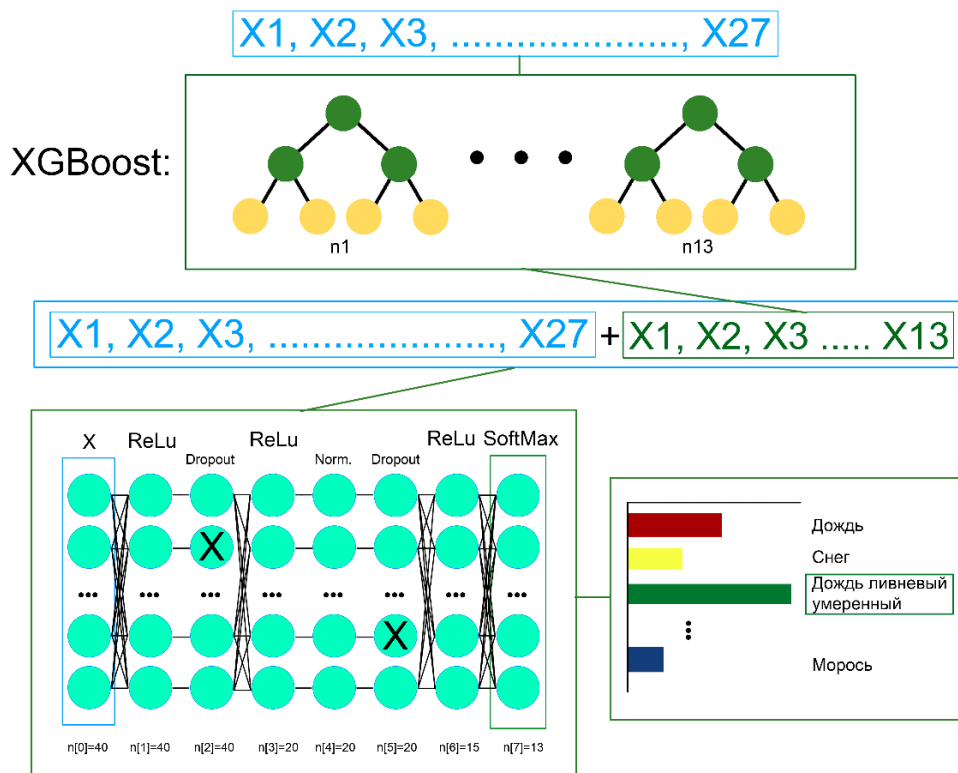


Рисунок 6. Схема архитектуры алгоритма детектирования атмосферных явлений.

После процедуры обучения и тестирования на данных реанализа, алгоритм был адаптирован для работы с полярно-орбитальными космическими аппаратами, а в частности с восстановленными в специализированном программном комплексе (ПК) MIRS вертикальными профилями температуры и влагосодержания.

Для оценки возможности использования разработанного алгоритма с данными спутникового зондирования были проведены оценки точности восстановления метеорологических параметров по высотам для территории Сибири. Значения вертикальных профилей метеовеличин полученных с помощью дистанционного зондирования сравнивались с данными реанализа ERA5, принятыми за эталон. Сравнение проводилось при временной разнице между эталонными данными и данными спутниковых измерений не более 5 минут, и только в точках полного пространственного совпадения. Расхождение значений метеопараметров, восстановленных по спутниковым данным, с данными реанализа представлены в таблице 1 «До корректировки».

Несмотря на то, что профили, восстановленные по спутниковым измерениям ПК MIRS удовлетворяют требованиям ВМО по точности, для уменьшения ошибок алгоритма детектирования атмосферных явлений был разработан блок корректировки состоящий из 12 обученных нейронных сетей прямого распространения. Так, метеопараметры были скорректированы на основе эталонных данных. В таблице 2 представлены оценки точности данных спутникового зондирования относительно эталонных данных для удельного влагосодержания и температуры по высотам до и после корректировки.

Таблица 1. Расхождение значений метеопараметров, восстановленных по спутниковым данным, с данными реанализа до и после корректировки.

Переменная	До корректировки			После корректировки		
	Средне-квадратическая ошибка	Средняя квадратическая ошибка	Средняя абсолютная ошибка	Средне-квадратическая ошибка	Средняя квадратическая ошибка	Средняя абсолютная ошибка
Температура на 1000 гПа	3,47	12,07	2,65	2,07	4,9	1,68
Температура на 900 гПа	3,78	14,28	3,00	1,89	4,53	1,6
Температура на 850 гПа	2,98	8,86	2,32	1,71	3,77	1,47
Температура на 700 гПа	1,90	3,62	1,45	1,16	1,69	0,98
Температура на 500 гПа	1,62	2,64	1,21	1,06	1,32	0,85
Температура на 300 гПа	2,03	4,13	1,61	1,42	2,14	1,1
Удельное влагосодержание на 1000 гПа	1,70	2,89	1,30	1,03	1,31	0,86
Удельное влагосодержание на 900 гПа	1,43	2,06	1,11	0,95	1,11	0,79
Удельное влагосодержание на 850 гПа	1,31	1,72	1,01	0,93	1,04	0,75
Удельное влагосодержание на 700 гПа	0,97	0,93	0,75	0,75	0,67	0,6
Удельное влагосодержание на 500 гПа	0,36	0,13	0,25	0,27	0,08	0,21
Удельное влагосодержание на 300 гПа	0,048	0,002	0,033	0,03	0,0014	0,026

Разработанная предварительная коррекция данных позволила уменьшить значения среднеквадратического отклонения для температур в среднем на 42 %, а для удельной влажности на 38 %. Коррекция всех метеопараметров происходит параллельно, что позволяет в значительной степени увеличить скорость обработки.

Оценки точности восстановления метеорологических параметров по высотам для территории Сибири показали, что разработанный алгоритм возможно применить к данным спутникового зондирования, поскольку отклонения метеопараметров находятся в пределах, рекомендованных ВМО. Несмотря на это были проведены испытания точности детектирования атмосферных явлений на данных спутникового зондирования.

ГЛАВА 2. ВАЛИДАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ, НА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПК MIRS ПО СИБИРСКОМУ РЕГИОНУ И ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ФГБУ «ЗАПАДНО СИБИРСКОЕ УГМС»

При валидации, данные наземных наблюдений использовались как эталонные. В валидационных испытаниях участвовали метеорологические станции, входящие в зону ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС» ($49,9^{\circ} - 60,35^{\circ}$ с.ш. и $75,68^{\circ} - 88,67^{\circ}$ в.д.).

Оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз проводилась на основе штормовых телеграмм в коде WAREP, предоставленных ФГБУ «Западно Сибирское УГМС». Оценка достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений (дождь, морось, зерна снежные, снег, снег мокрый, дождь ливневый слабый, дождь ливневый умеренный, дождь ливневый сильный, снег ливневый, ледяная крупа, крупа снежная, снег ливневый мокрый) проводилась на основе информации из открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД, содержащей данные о типах атмосферных явлений, их интенсивности и времени начала/окончания.

Для проведения испытаний данные наземных наблюдений проходили процедуру пространственного и временного совмещения с данными дистанционного зондирования. Для временного совмещения задавалась минимально возможная разница (не более 10 минут) во времени между пролетом космического аппарата и наблюдениями на станции. Пространственное совмещение заключалось в восстановлении вертикальных профилей по спутниковым измерениям непосредственно над метеорологической станцией, либо использовании измерений на заданном (не более 10 км) расстоянии от станции.

2.1 Оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз по данным штормовых телеграмм в коде WAREP

При испытаниях привлекались данные наблюдений на 124 метеорологических станциях ФГБУ «Западно Сибирское УГМС», расположенных в границах $49,9^{\circ} - 60,35^{\circ}$ с.ш. и $75,68^{\circ} - 88,67^{\circ}$ в.д. За периоды испытаний: май – ноябрь 2019 г. и май – сентябрь 2020 г. грозовые явления отмечались на 109 станциях.

Для оценки достоверности детектирования вероятных зон гроз использовалась выборка данных метеостанций, содержащая в себе:

- индекс станции;
- широту и долготу станции;
- дату;
- время начала и окончания грозы.

Данные наземных наблюдений и восстановленные по спутниковым измерениям параметры атмосферы были совмещены в пространстве (расстояние от станции не более 10 км) и времени (разница во времени наблюдений не более 10 минут).

Для корректной оценки количества ложного детектирования гроз моделями, массив был дополнен случаями отсутствия грозовых явлений в момент пролета КА. Условием отбора случаев без грозы были значения параметров атмосферы близкие к параметрам при грозах. Близость определялась как среднее значение параметра атмосферы при грозах, плюс минус стандартное отклонение. Использование массива с однородно распределенными параметрами атмосферы при наличии и отсутствии грозового явления делает невозможным классификацию по пороговым значениям. Т.е. полученная выборка исключает случайный прогноз грозового явления по достижению параметром атмосферы значения, при котором гроза статистически возможна. Использование заведомо сложной для классификации

выборки позволяет оценить, насколько эффективно разработанная модель улавливает закономерности в структурах параметров.

Итоговый массив содержал 3330 случаев, из которых 1591 случай наличия грозового явления на станции в момент пролета КА и 1738 случаев с отсутствием грозового явления. В процентном соотношении число случаев с грозами и без гроз составляло 47,8 % и 52,2 %. Достоверность, превышающая значение 52,2 %, может считаться положительным результатом, поскольку превышает вероятность случайного прогноза.

Оценочные характеристики таблицы сопряженности бинарных прогнозов рассчитывались в соответствии с РД 52.27.284–91. Оценка достоверности производилась для значений вероятности от 5 до 100 % с шагом в 5 %. В таблице 2 представлены результирующие оценки по станциям, входящим в зону ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС».

Максимальное значение общей оправдываемости ($OO = 69\%$) и максимальное значение Критерия Пирси-Обухова ($T=0,4$) отмечается при 75 % вероятности наличия гроз. Положительные значения T свидетельствуют о том, что предупреденность явления ($\Piя$) превышает отношение ошибочных прогнозов явления к фактическому числу дней без явления. При значении вероятности развития гроз 80 %, достоверность фактического наличия грозы ($O+$) составляет 78 %, и возрастает с увеличением вероятности.

Для каждой из 109 станций, входящих в зону ответственности Западно-Сибирского УГМС, были рассчитаны матрицы сопряженности для значений вероятности развития гроз от 50 % до 90 % с шагом 10 %. Результаты расчетов представлены в Приложении 1 (таблицы П1.1 – П1.5). При увеличении значений вероятности развития гроз, начиная с точки $51^\circ - 52^\circ$ с.ш., $80^\circ - 81^\circ$ в.д. и движении в С-В направлении, происходит увеличение общей оправдываемости.

Таблица 2. Результирующие оценки детектирования зон гроз по станциям, входящим в зону ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС».

Вероятность развития грозового явления по расчетам методики, %	Матрица сопряженности, кол.-во случаев					Расчетные оценки, %							Т	U _я + П _я
	n ₁₁	n ₁₂	n ₂₁	n ₂₂	n ₀₀	O ⁺	O ⁻	OO	P ⁺	P ⁻	ФФ ⁺	ПП ⁺		
5	1565	1738	27	0	3330	47	0	47	98	0	48	99	0,0	146
10	1541	1738	51	0	3330	47	0	46	97	0	48	98	0,0	144
15	1521	1738	71	0	3330	47	0	46	96	0	48	98	0,0	142
20	1512	1736	80	2	3330	47	2	45	95	0	48	98	0,0	142
25	1498	1734	94	4	3330	46	4	45	94	0	48	97	-0,1	140
30	1478	1726	114	12	3330	46	10	45	93	1	48	96	-0,1	139
35	1456	1699	136	39	3330	46	22	45	91	2	48	95	-0,1	138
40	1416	1580	176	158	3330	47	47	47	89	9	48	90	0,0	136
45	1366	1408	226	330	3330	49	59	51	86	19	48	83	0,0	135
50	1295	1188	297	550	3330	52	65	55	81	32	48	75	0,1	133
55	1195	969	397	769	3330	55	66	59	75	44	48	65	0,2	130
60	1108	788	484	950	3330	58	66	62	70	55	48	57	0,2	128
65	1007	632	585	1106	3330	61	65	63	63	64	48	49	0,3	125
70	926	443	666	1295	3330	68	66	67	58	75	48	41	0,3	126
75	844	300	748	1438	3330	74	66	69	53	83	48	34	0,4	127
80	733	207	859	1531	3330	78	64	68	46	88	48	28	0,3	124
85	614	107	978	1631	3330	85	63	67	39	94	48	22	0,3	124
90	456	40	1136	1698	3330	92	60	65	29	98	48	15	0,3	121
95	283	0	1309	1738	3330	100	57	61	18	100	48	8	0,2	118
100	0	0	1592	1738	3330	-	52	52	0	100	48	0	0,0	-

Таким образом, валидационные испытания по оценке достоверности детектирования вероятных зон гроз для территории ФГБУ «Западно Сибирское УГМС» с использованием данных штормовых телеграмм в коде WAREP показали:

1. Успешно выделяются зоны возможных грозовых явлений по распределению метеопараметров в столбе атмосферы, в условиях, когда это невозможно сделать пороговыми методами. Карты вероятных зон развития гроз отображают 6 градаций возможного фактического нахождения гроз в каждом пикселе (0 – 50 %, 50 – 60 %, 60 – 70 %, 70 – 80 %, 80 – 90 %, 90 – 100 %). Принцип отображения значений вероятности аналогичен ДМРЛ С;

2. В оперативной работе синоптика, в первую очередь, стоит обращать внимание на участки со значениями вероятности развития гроз > 80 %. При

значении вероятности развития гроз 80 %, достоверность фактического наличия грозы (O+) составляет 78 %. С увеличением значений вероятности достоверность фактического наличия гроз увеличивается. Ложноположительное детектирование гроз при значениях вероятности > 80 % происходит редко;

3. Для уменьшения количества ложного детектирования рекомендуется использовать карты вероятных зон развития гроз совместно с картами параметров облачного покрова (типы облачности, высота и температура ВГО), что позволяет исключать зоны с отсутствующей облачностью.

2.2 Оценка достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений по данным ВНИИГМИ МЦД.

Испытания проводились по 23 метеорологическим станциям территории ФГБУ «Западно Сибирское УГМС», расположенных в границах 50° – 61° с.ш. и 76° – 89° в.д.. Испытания проводились с мая по октябрь 2019 г. На момент валидационных испытаний, данные за 2020 г. в открытой базе данных ВНИИГМИ МЦД отсутствовали.

Для оценки достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений использовалась выборка данных, содержащая в себе:

- индекс станции;
- широту и долготу станции;
- дату;
- шифр атмосферного явления, зафиксированного на станции;
- интенсивность атмосферного явления;
- время начала и окончания атмосферного явления.

Сравнение результатов расчетов моделей с данными наземных метеостанций проводилось по следующим атмосферным явлениям: дождь (шифр явления 118), морось (26), снег (27), снег мокрый (15), дождь ливневый слабый (1381), дождь ливневый умеренный (444), дождь ливневый сильный (40), снег ливневый

(296), крупа снежная (9), снег ливневый мокрый (147). Оценка точности детектирования снежных зерен и ледяной крупы не проводилась по причине их отсутствия в период испытаний.

Данные наземных наблюдений и восстановленные по спутниковым измерениям параметры атмосферы были совмещены в пространстве (расстояние от станции не более 10 км) и времени (разница во времени наблюдений не более 5 минут).

Для корректной оценки количества ложного детектирования атмосферных явлений методикой выборка была сбалансирована. Условием отбора случаев без атмосферных явлений были значения параметров атмосферы близкие к параметрам атмосферы при наличии атмосферных явлений. Близость определялась как среднее значение параметра атмосферы при явлении, плюс-минус стандартное отклонение. Для каждого явления подбор случаев без явления осуществлялся индивидуально.

Итоговый массив содержал 5006 случаев, из них 2503 случая с осадками различной интенсивности / фазового состояния и 2503 случая отсутствия явлений. Под отсутствием явления подразумевается либо его полное отсутствие (на станции не наблюдалось никаких явлений), либо явления, не входящие в перечень испытуемых. Оценка достоверности методики производилась в строгом соответствии с наблюдениями на станции – если наблюдателем были зафиксированы ливневые осадки слабой интенсивности, а модель определила ливневые осадки умеренной интенсивности, результат классификации считался неверным.

Оценочные характеристики таблицы сопряженности бинарных прогнозов рассчитывались в соответствии с РД 52.27.284–91. В таблице 3 представлены результирующие оценки детектирования атмосферных осадков разной интенсивности и фазового состояния по 23 станциям, входящим в зону ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС».

Таблица 3. Результирующие оценки детектирования атмосферных явлений по станциям, входящим в зону ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС».

Атмосферное явление	Матрица сопряженности, кол.-во случаев					Расчетные оценки, %						Т		$(U_{я} + П_{я})$
	n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{00}	O^+	O^-	$\frac{O}{O}$	P^+	P^-	$\Phi\Phi^+$	ПП+		
Дождь	94	28	24	90	236	77	79	78	80	76	52	50	0,56	157
Морось	20	7	6	19	52	74	76	75	77	73	52	50	0,50	151
Снег	23	3	4	24	54	88	86	87	85	89	48	50	0,74	174
Снег мокрый	14	2	1	13	30	88	93	90	93	87	53	50	0,80	181
Дождь ливневый слабый	116 2	19 5	21 9	118 6	276 2	86	84	85	84	86	49	50	0,70	170
Дождь ливневый умеренный	381	66	63	378	888	85	86	85	86	85	50	50	0,71	171
Дождь ливневый сильный	32	5	8	35	80	86	81	84	80	88	46	50	0,68	166
Снег ливневый	240	59	56	237	592	80	81	81	81	80	51	50	0,61	161
Крупа снежная	8	4	1	5	18	67	83	72	89	56	67	50	0,44	156
Снег ливневый мокрый	124	16	23	131	294	89	85	87	84	89	48	50	0,73	173

Общая оправдываемость (ОО) для всех явлений не опускается ниже 72 %. Минимальное значение общей оправдываемости отмечается для снежной крупы, максимальные отмечаются при выпадении снега – снег мокрый (90 %), снег (87 %). Наибольшая оправдываемость наличия явления ($O^+ = 89\%$) отмечается у мокрого ливневого снега, наименьшая у снежной крупы – 67 %. Максимальное значение предупрежденности факта наличия явления ($P^+ = 93\%$) у мокрого снега (93 %), минимальное значение у мороси (77 %). Критерий Пирси-Обухова (Т) максимален для снега и мокрого снега – 0,74 и 0,80 соответственно, минимален для мороси – 0,5. Полученные значения критерия Пирси-Обухова говорят о высокой достоверности детектирования всех атмосферных явлений. Значения суммарного показателя ($U_{я} + П_{я}$) говорят об удовлетворительном качестве прогноза для всех явлений. Максимальное значение суммарного показателя ($U_{я} + П_{я}$) отмечается для мокрого снега – 181 %.

Максимальное количество ложноположительного детектирования отмечается для снежной крупы – 44 %, что объясняется малым количеством случаев с явлением, минимальное для снега и мокрого ливневого снега – 11 %.

Максимальное количество ложноотрицательного детектирования отмечается для мороси – 23 %, минимальное для мокрого снега – 7 %.

Для каждой из 23 станций, входящих в зону ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС», была рассчитана общая оправдываемость для каждого атмосферного явления. Результаты расчетов представлены в Приложении 2. Минимальное значение общей оправдываемости (ОО) по всем явлениям зафиксировано на станции Первомайское и составляет 80 %. Максимальное значение общей оправдываемости (ОО) по всем явлениям отмечается на станциях Средний Васюган, Кызыл-Озек и Усть-Коксаи составляет 85 %. Оправдываемость для ливневых дождей различной интенсивности не опускается ниже 81 % для всех станций.

Для оценки достоверности моделей детектирования атмосферных явлений, в зависимости от географического расположения станции, для каждого квадрата 1° х 1° были рассчитаны средние значения ОО по всем явлениям (таблица 4). Поле общей оправдываемости не имеет явно выраженных максимумом и минимумов, средняя оправдываемость моделей по всем атмосферным явлениям варьируется от 80 % до 85 %.

Таблица 4. Зависимость значений общей оправдываемости всех атмосферных явлений от географического положения станции (%).

Широта, °	Долгота, °									
	76-77	78-79	79-80	81-82	82-83	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89
60-61	-	-	-	-	-	82	-	-	-	-
59-60	-	85	-	81	-	-	-	-	-	-
58-59	-	-	-	-	-	-	-	-	82	-
57-58	-	-	82	-	83	-	-	80	-	-
56-57	-	83	-	-	-	83	82	-	-	-
55-56	84	-	-	-	-	83	-	-	-	84
53-54	-	-	-	84	-	-	-	-	84	-
52-53	-	-	-	-	-	82	-	-	-	-
51-52	-	-	-	85	81	83	-	85	-	-
50-51	-	-	-	-	-	-	85	81	-	84

Таким образом, валидационные испытания по оценке достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений для территории управления ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», с использованием открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД показали:

1. Значения общей достоверности (ОО) детектирования зон атмосферных осадков различного фазового состояния и интенсивности расположены в интервале 72 % – 90 %. Суммарный показатель (Уя+Пя) для всех атмосферных явлений не менее 127 %. Минимальное значение (Уя+Пя) отмечается у снежных зерен, что объясняется малым количеством случаев данного атмосферного явления в выборке. Количество ложноположительных и ложноотрицательных случаев мало. Отмечается высокая достоверность детектирования осадков твердой и смешенной фазы в переходные сезоны, что является несомненным преимуществом методики. Ливневые осадки различной интенсивности детектируются в равной степени хорошо (общая достоверность не ниже 81 %);

2. Средние значения общей оправдываемости в зависимости от географического распределения метеорологических станций меняются незначительно (от 80 % до 85 %), что говорит о стабильной работе методики вне зависимости от географических особенностей точки исследования.

2.3 Результаты испытаний по Сибирскому региону

В валидационных испытаниях данные наземных наблюдений использовались как эталонные. В валидационных испытаниях участвовало 135 метеорологических станций Сибирского региона, ограниченного 50 – 70° с.ш. и 50 – 100° в.д.

Оценка достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений проводилась на основе информации из открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД, содержащей данные о типах атмосферных явлений, их интенсивности и времени начала/окончания.

Испытания проводились с мая по октябрь 2019 – 2020 гг.

Для испытания использовалась выборка данных, содержащая в себе:

- индекс станции;
- широту и долготу станции;
- дату;
- шифр атмосферного явления, зафиксированного на станции;
- интенсивность атмосферного явления;
- время начала и окончания атмосферного явления.

Сравнение расчетов методики с данными наземных метеостанций проводилось по следующим атмосферным явлениям: гроза (шифр явления – 80, 81), дождь (63), морось (62), снег (70), снег мокрый (72), дождь ливневый слабый (64/0), дождь ливневый умеренный (64/1), дождь ливневый сильный (64/2), снег ливневый (71), крупа снежная (54), снег ливневый мокрый (73), зерна снежные (54) и ледяная крупа (52).

Данные наземных наблюдений и восстановленные по спутниковым измерениям параметры атмосферы были совмещены в пространстве (не более 10 км) и времени (разница во времени наблюдений не более 5 минут).

Итоговый массив содержал 52 730 записей, из них 967 случаев с грозой, 18 266 случаев с осадками различной интенсивности / фазового состояния и 33 497 случаев отсутствия явлений. Под отсутствием явления подразумевается либо его полное отсутствие (на станции не наблюдалось никаких явлений), либо явления, не входящие в перечень основных для которых производилась разработка методики.

Оценка оправдываемости выделения атмосферных осадков разной интенсивности / фазового состояния, и оценка оправдываемости гроз проводилась отдельно друг от друга. При оценке достоверности выделения гроз принимался порог в 50 % – при достижении этого значения вероятности считается, что гроза фиксируется. Оценка производилась в строгом соответствии с наблюдениями на станции – если наблюдателем были зафиксированы ливневые осадки слабой интенсивности, а методика определила ливневые осадки умеренной интенсивности, то результат классификации считался неверным.

В таблице 5 представлены результаты оправдываемости по выделению атмосферных осадков разной интенсивности и фазового состояния. Из 18 266 явлений с осадками, зафиксированных на метеорологических станциях, моделями правильно определены атмосферные явления в 14 969 случаях, что составляет 81,95 %.

Таблица 5. Результирующие оценки детектирования атмосферных явлений по Сибирскому региону.

Атмосферное явление	Матрица сопряженности, кол.-во случаев					Расчетные оценки, %							Т	(U _я + П _я)
	n ₁₁	n ₁₂	n ₂₁	n ₂₂	n ₀₀	O ⁺	O ⁻	OO	P ⁺	P ⁻	ФФ ⁺	ПП ⁺		
Дождь	2598	1366	693	5782	10439	66	89	80	79	81	38	31,5	0,60	144
Морось	475	322	160	1368	2325	60	90	79	75	81	34	27,3	0,56	134
Зерна снежные	5	4	2	20	31	56	91	81	71	83	29	22,6	0,55	127
Снег	426	197	87	751	1461	68	90	81	83	79	43	35,1	0,62	151
Снег мокрый	306	147	65	636	1154	68	91	82	82	81	39	32,1	0,64	150
Дождь ливневый слабый	7355	2647	1614	11795	23411	74	88	82	82	82	43	38,3	0,64	156
Дождь ливневый умеренный	1174	361	104	1996	3635	76	95	87	92	85	42	35,2	0,77	168
Дождь ливневый сильный	183	97	43	321	644	65	88	78	81	77	43	35,1	0,58	146
Снег ливневый	1131	592	262	2364	4349	66	90	80	81	80	40	32,0	0,61	147
Ледяная крупа	11	7	3	29	50	61	91	80	79	81	36	28,0	0,59	140
Крупа снежная	88	42	30	234	394	68	89	82	75	85	33	29,9	0,59	142
Снег ливневый мокрый	1217	429	234	1990	3870	74	89	83	84	82	43	37,5	0,66	158

Наименьшая общая оправдываемость (OO) отмечается при детектировании мороси и сильных ливневых осадков – 79 % и 78 %, соответственно. Лучшие показатели детектирования у ливневого умеренного дождя и ливневого мокрого снега – 87 % и 83 %, соответственно. Наибольшая оправдываемость наличия явления (O+= 76 %) отмечается также при ливневом умеренном дожде, наименьшая у снежных зерен – 56 %. Максимальное значение предупреденности факта наличия явления (P+) у ливневого умеренного дождя (92 %) и ливневого мокрого снега (84 %), минимальное значение у мороси (75 %), снежных зерен (71 %) и снежной крупы (75 %). Критерий Пирси-Обухова (Т) максимален для ливневого

дождя умеренной интенсивности – 0,77, минимален для снежных зерен – 0,55. Полученные значения критерия Пирси-Обухова говорят о высокой достоверности детектирования всех атмосферных явлений. Значения суммарного показателя (Уя+Пя) говорят об удовлетворительном качестве прогноза для всех явлений. Максимальное значение суммарного показателя (Уя+Пя) отмечается также при умеренном ливневом дожде – 168 %.

Максимальное количество ложноположительного детектирования отмечается для сильного ливневого дождя – 23 %, осредненное по всем явлениям, значение ложноположительного детектирования составляет 19 %. Среднее значение ложноотрицательного детектирования составляет – 20 % и имеет минимальные значения при умеренном ливневом дожде – 8 %.

Результаты оценки оправдываемости выделения гроз моделями представлены в таблице 6. Всего, из содержащихся в массиве 967 случаев с грозой на станции, гроза правильно выделена в 821 случае, что составляет 84,9 %. Отсутствие грозы верно определено в 83,21 % случаев.

Таблица 6. Количество гроз в выборке и их оправдываемость

Явление	Всего зафиксировано на станциях	Определено верно	Определено неверно	Общая оправдываемость, %
Гроза не фиксировалась на станции	33497	27874	5623	83,21
Гроза фиксировалась на станции	967	821	146	84,90
Итого	141990	119010	22980	83,82

Выборка для гроз была сбалансирована путем уменьшения количества наблюдений «без явления» с сохранением предупреденности и общей оправдываемости методики. В таблице 7 представлены результаты выделения зон гроз в соответствии с РД 52.27.284–91.

Таблица 7. – Таблица сопряженности выделения гроз методикой с фактическими данными о грозах на станциях (Форма 9, РД 52.27.284–91)

Прогноз	Наблюдалось		Сумма	U	U+П
	Явление	Без явления			
Явление	821	156	977	84,03	168,93
Без явления	146	810	956	84,72	168,49
Сумма	967	966	1933	84,3	
П	84,90	83,76			
			0,69	0,68	

Как видно из таблицы, общая оправдываемость составляет 84,3 %. Оправдываемость наличия грозы составляет 84,03 %, отсутствия – 84,72 %. Критерий надежности Н.А. Багрова составляет 0,68, что больше порогового значения 0,33 и говорит о надежности прогноза. Критерий качества прогнозов Пирси-Обухова составляет 0,69 – т.е. предупреденность явления превышает отношение ошибочных прогнозов явления к фактическому числу дней без явления. Суммарный показатель (Uя+Пя) составляет 168,93 % и характеризует качество прогноза как удовлетворительное.

Таким образом, валидационные испытания по оценке достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений для территории Сибири, ограниченной 50 – 70° с.ш. и 50 – 100° в.д. с использованием открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД показали:

1. Общая оправдываемость (ОО) детектирования зон атмосферных осадков различного фазового состояния и интенсивности расположена в интервале 78 % – 87 %. Суммарный показатель (Uя+Пя) практически для всех атмосферных явлений не менее 127 %, за исключением снежных зерен, что может быть обусловлено малым количеством случаев этого явления в выборке. Количество ложноположительных и ложноотрицательных случаев мало и сбалансированно (около 20 %). Общая оправдываемость (ОО) детектировании грозových явлений > 84 %;

2. Рекомендуется использовать карты вероятных зон развития гроз совместно с картами параметров облачного покрова (типы облачности, высота и

температура ВГО), привлечение подобной информации необходимо для исключения ложного детектирования в зонах с отсутствующей облачностью, поскольку методика основывается исключительно на значениях параметров атмосферы.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПО МЕТЕОСТАНЦИЯМ ТЕРРИТОРИИ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ФГБУ «ЗАПАДНО СИБИРСКОЕ УГМС»

Согласно решению Технического совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 09 февраля 2021 г технология выделения вероятностных зон гроз и атмосферных осадков различной интенсивности в летний период для территории Сибири по данным спутникового зондирования была принята на оперативные испытания в ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Цель оперативных испытаний – оценка достоверности технологии детектирования вероятных зон атмосферных явлений и определение возможности использования данной технологии в подразделениях Росгидромета.

Оперативные испытания проводились специалистами ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» и непосредственно автором в период с 01 апреля по 30 сентября 2021г.

3.1 Оценка достоверности детектирования вероятных зон ливневых осадков над метеостанцией и в радиусе 50 км по данным фактических наблюдений по станциям региона в коде КН-01 SYNOP

При испытаниях привлекались данные наблюдений на 109 метеорологических станциях ФГБУ «Западно Сибирское УГМС», расположенных в границах $49,9^{\circ} - 60,35^{\circ}$ с.ш. и $75,68^{\circ} - 88,67^{\circ}$ в.д. За периоды испытаний: апрель-сентябрь 2021 г. грозовые явления отмечались на всех 109 станциях.

Для оценки достоверности детектирования вероятных зон гроз использовалась выборка данных метеостанций, содержащая в себе:

- индекс станции;
- дату;

– данные раздела 1 группы 7 кода КН-01 об погоде в срок наблюдения и прошедшей погоде.

Данные наземных наблюдений и детектируемые по спутниковым данным атмосферные явления были совмещены в пространстве и времени.

Для корректной оценки количества ложного детектирования гроз технологией, массив был дополнен случаями отсутствия грозовых явлений в момент пролета КА.

Итоговые массивы содержали:

– Над станцией 1088 случаев, из которых 76 случаев наличия грозового явления на станции в момент пролета КА и 1012 случаев с отсутствием грозового явления. В процентном соотношении число случаев с грозами и без гроз составляло 7 % и 93 %.

– В радиусе 30 км от станции 4670 случаев, из которых 263 случая наличия грозового явления на станции в момент пролета КА и 4407 случаев с отсутствием грозового явления. В процентном соотношении число случаев с грозами и без гроз составляло 6 % и 94 %.

Оценочные характеристики таблицы сопряженности бинарных прогнозов рассчитывались в соответствии с «Методическими указаниями по проведению испытаний...». Оценка достоверности производилась для всей территории за каждый месяц и за весь период испытаний для субъектов РФ находящихся в зоне ответственности ФГБУ «Западно Сибирское УГМС». В Приложении 3, Таблица ПЗ.1 - ПЗ.4 представлены матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% над станцией и в радиусе 30 км для всей территории по месяцам, а также обобщены результаты за период испытаний с разделением по субъектам.

При детектировании гроз над станцией в ежемесячной оценке, максимальное значение общей оправдываемости (99,38%) и максимальное значение Критерия Пирси-Обухова (0,99) отмечается в сентябре, однако стоит учесть, что в этот месяц, в синхронные с пролетом КА сроки, попала всего 1 гроза. Наибольшее количество гроз, попавших в синхронные сроки приходится на июль месяц. Значение общей

оправдываемости составляет 92,82%. При этом значение критерия Пирси-Обухова равен 0,6, а критерий надежности по Н. А. Багрову равен 0,62, что превышает пороговое значение 0,33 и говорит о надежности детектирования. В целом, замечено, что вне зависимости от месяца технологией успешно детектируется большая часть случаев с грозовыми явлениями. Среднее значение предупрежденности за весь период оперативных испытаний составляет 72,6%, а оправдываемости наличия явления 77,6%. Критерий Пирси-Обухова, критерий надежности по Н. А. Багрову и суммарный показатель (оправдываемость+предупрежденность) говорят о надежности детектирования. Значение общей оправдываемости свидетельствует о том, что технологией успешно классифицируется в среднем 95,9% событий.

При детектировании гроз над станцией в зависимости от субъекта, замечено, что наибольшее значения общей оправдываемости (98,6%) имеют станции, расположенные на территории Томской области. Немного хуже грозы детектируются над станциями Алтайского края и Республики Алтай, но при этом значение общей оправдываемости не опускается ниже 92%. Наибольшую оправдываемость наличия явления, также имеет Томская область (100% гроз успешно детектированы). Критерий Пирси-Обухова и критерий надежности по Н. А. Багрову говорят об удовлетворительном качестве детектирования на территории всех субъектов.

Дополнительно были проанализированы случаи ложного детектирования гроз над станцией с целью выявления атмосферных явлений, при которых они происходили. Распределение атмосферных явлений при случаях ложного детектирования гроз над станцией представлено на рисунке 7. Как можно заметить ложное детектирование гроз происходило преимущественно при наблюдении на станции ливневых осадков слабой интенсивности. Ложного детектирования при полном отсутствии атмосферных явлений на станции не наблюдалось. Также стоит отметить, что при грозах между сроками наблюдений в 18% случаев технология детектировала грозы. Все представленные явления связаны с развитием конвекции

в атмосфере, как непосредственно и гроза, в связи, с чем и происходило ложное детектирование.



Рисунок 7. Распределение атмосферных явлений при случаях ложного детектирования гроз над станцией.

Рассматривая результаты детектирования гроз с вероятностью $>80\%$ в радиусе 30 км от станции, можно заметить, что значение общей оправдываемости не опускается ниже 90%. Максимальное значение оправдываемости наличия явления фиксируется в августе и составляет 89,55%. Наилучшая предупрежденность отмечается в июне и составляет 90,3% при оправдываемости 75,67%. Критерий Пирси-Обухова, критерий надежности по Н. А. Багрову и суммарный показатель (оправдываемость+предупрежденность) говорят о надежности детектирования во все месяцы кроме сентября. Это обусловлено малым количеством гроз, попавших в анализируемую выборку (1 гроза).

Результаты детектирования по субъектам РФ показали, что значение общей оправдываемости не опускается ниже 90%. Близкие результаты имеют Томская область, Новосибирская область, Кемеровская область (97-98%). Значение предупрежденности по всем субъектам превышает 74%. Лучшее значение предупрежденности получено на территории Республики Алтай, которое составляет 82,14%. Однако этот субъект имеет наименьшее значение оправдываемости наличия явления (35,38%). Такие показатели скорее всего

обусловлены орографическими особенностями расположения станций. Проходящая в радиусе 30 км гроза могла быть не замечена наблюдателем на станции ввиду закрытости горизонта горами. Поэтому для Республики Алтай правильнее пользоваться результатами оценки детектирования гроз непосредственно над станцией.

3.2 Оценка достоверности детектирования вероятных зон ливневых осадков над метеостанцией и в радиусе 50 км по данным фактических наблюдений по станциям региона в коде КН-01 SYNOP

При испытаниях привлекались данные наблюдений на 109 метеорологических станциях ФГБУ «Западно Сибирское УГМС», расположенных в границах $49,9^{\circ} - 60,35^{\circ}$ с.ш. и $75,68^{\circ} - 88,67^{\circ}$ в.д. За периоды испытаний: апрель-сентябрь 2021 г. ливневые осадки отмечались на всех 109 станциях.

Для оценки достоверности детектирования вероятных зон жидких ливневых осадков использовалась выборка данных метеостанций, содержащая в себе:

- индекс станции;
- дату;
- данные раздела 1 группы 7 кода КН-01 об погоде в срок наблюдения и прошедшей погоде.

Данные наземных наблюдений и детектируемые по спутниковым данным атмосферные явления были совмещены в пространстве и времени.

Для корректной оценки количества ложного детектирования ливневых осадков технологией, массив был дополнен случаями отсутствия осадков в момент пролета КА.

Итоговые массивы содержали:

- Над станцией, 1193 случая, из которых 904 случая наличия ливневых осадков на станции в момент пролета КА и 289 случаев с отсутствием явлений. В

процентном соотношении число случаев с ливневыми осадками и без них составляло 76% и 24 %.

– В радиусе 50 км от станции, 5288 случаев, из которых 4002 случая наличия ливневых осадков на станции в момент пролета КА и 1286 случаев с отсутствием атмосферных явлений. В процентном соотношении число случаев с ливневыми осадками и без них составляло 76% и 24 %.

Оценка достоверности производилась для всей территории за каждый месяц и за весь период испытаний для субъектов РФ, находящихся в зоне ответственности ФГБУ «Западно -Сибирское УГМС». В Приложении 3, Таблицы ПЗ.5 - ПЗ.8 представлены матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования ливневых осадков над станцией и в радиусе 50 км для всей территории по месяцам, а также обобщены результаты за период испытаний с разделением по субъектам.

При детектировании ливневых осадков над станцией, максимальное значение общей оправдываемости зафиксировано в апреле и составляет 77,14%. Максимальные значения критерия Пирси-Обухова и суммарного показателя «оправдываемость+предупрежденность» также отмечено в апреле и составляет 0,66 и 174,1%. Во все месяцы наблюдается превышение порогового значения в 130% для суммарного показателя «оправдываемость+предупрежденность». Оправдываемость наличия явления во все месяцы не опускается ниже 75,86%. Максимальное значение предупрежденности наблюдалось в июне и составило 75,9%. В среднем за весь период испытаний, значение общей оправдываемости составляет 71,9%, оправдываемости наличия явления – 91%, предупрежденности ливневых осадков – 68,4%. Значения критерия Пирси-Обухова, критерия надежности по Н. А. Багрову и суммарного показателя (оправдываемость + предупрежденность) свидетельствуют о надежности детектирования.

При детектировании ливневых осадков над станцией замечено, что наибольшее значения общей оправдываемости (71,42%) имеют станции, расположенные на территории Кемеровской области. Значение общей оправдываемости для станций, расположенных на территории Томской и

Новосибирской области составляет 63-64%. Наибольшую оправдываемость наличия явления, имеют станции, расположенные на территории Алтайского края, Республики Алтай и Томской области. При этом станции Республики Алтай, имеют наименьшую предупрежденность 47,36%. Это можно обосновать сложным рельефом этой территории и в частности сложностью восстановления значений метеопараметров на территориях с большими перепадами высот. Несмотря на это суммарный показатель (оправдываемость+предупрежденность) превышает пороговое значение в 130%, что говорит об удовлетворительном качестве детектирования.

Рассматривая результаты детектирования ливневых осадков в радиусе 50 км от станции в месячном распределении, можно заметить, что значение общей оправдываемости не опускается ниже 71,51%, Максимальное значение оправдываемости наличия явления фиксируется в июне и составляет 93,81%, из 292 зафиксированных осадков технологией успешно детектировано 258 событий, что соответствует значению предупрежденности 88,35%. Наилучшая предупрежденность отмечается в сентябре и составляет 92,36% при оправдываемости 88,6%. Критерий Пирси-Обухова, критерий надежности по Н. А. Багрову и суммарный показатель (оправдываемость+предупрежденность) говорят о надежности детектирования во все месяцы кроме сентября. Это объясняется большим количеством событий с выпадением ливневых осадков и малым количеством сроков без осадков, попавших в синхронные с пролетом КА сроки.

Анализируя результаты детектирования по субъектам РФ, замечено, что значение общей оправдываемости не опускается ниже 72,56%. Все субъекты имеют близкие результаты, варьирующиеся от 72,56% до 79,45%. Значение предупрежденности по всем субъектам превышает 80%. Лучшее значение предупрежденности получено для территории Кемеровской области и составляет 87,85%. Наряду с этим, этот субъект имеет наименьшее значение оправдываемости наличия явления (80,76%). Суммарный показатель (оправдываемость+предупрежденность) говорит о надежности детектирования

ливневых осадков во всех субъектах зоны ответственности. Значение оправдываемости наличия ливневых осадков по всем субъектам превышает 80%.

3.3 Оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз с вероятностью >80% над метеостанцией по данным фактических наблюдений по станциям региона в коде WAREP

При испытаниях привлекались данные штормовых телеграмм в коде WAREP по 109 метеорологическим станциям ФГБУ «Западно Сибирское УГМС», расположенным в границах 49,9° – 60,35° с.ш. и 75,68° – 88,67° в.д. За периоды испытаний: апрель-сентябрь 2021 г. грозы отмечались на всех 109 станциях.

Для оценки достоверности детектирования вероятных зон гроз использовалась выборка штормовых телеграмм, содержащая в себе:

- индекс станции;
- код явления (гроза на станции - 91, гроза в окрестности -92);
- тип сообщения (возникновение - 0, окончание -1);
- дата и время.

Данные штормовых телеграмм и детектируемые по спутниковым данным атмосферные явления были совмещены в пространстве и времени. Если в момент пролета КА станцией не передавалась штормовая телеграмма о грозе, то такой случай рассматривался как отсутствие явления. Если в момент пролета КА на станции и в окрестности наблюдается гроза, то есть сообщение о возникновении явления передано раньше пролета, а сообщение об окончании передано позже пролета, то такой случай идентифицировался как наличие грозы.

Итоговые массивы содержали 50208 случаев, из которых 322 случая наличия грозы на станции в момент пролета КА и 49883 случая с отсутствием явлений.

Оценка достоверности производилась для всей территории за весь период испытаний (апрель-сентябрь 2021г.), и за весь период испытаний для субъектов РФ, находящихся в зоне ответственности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». В

Приложении 3, Таблица ПЗ.9 представлены матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% над станцией по субъектам РФ, по данным WAREP. В таблице 8 представлена матрица сопряженности детектированных технологией гроз с вероятностью >80% с фактическими данными о грозах на станциях из телеграмм в коде WAREP.

Таблица 8. Матрица сопряженности детектированных технологией гроз с вероятностью >80% с фактическими данными о грозах на станциях из телеграмм в коде WAREP

Детектировано	Наблюдалось		Сумма	U	U+П
	Явление	Без явления			
Явление	228	85	313	72,8	143,6
Без явления	94	49798	49892	99,8	199,6
Сумма	322	49883	50208	-	-
П	70,8	99,8	-	99,6	-
-	-	-	0,71	0,72	-

При детектировании гроз над станцией за весь период оперативных испытаний значение общей оправдываемости составляет 99,6%. Такое большое значение обусловлено несбалансированностью выборки. Количество событий «без явления» в значительной степени превышает количество событий с «явлением». В этом случае значение общей оправдываемости не является показательным и стоит обращать внимание на предупреденность и оправдываемость наличия явления. Предупреденность грозы составила 70,8%, а оправдываемость – 72,8%. %. Критерий Пирси-Обухова (0,71), критерий надежности по Н. А. Багрову (0,72) и суммарный показатель (оправдываемость+предупреденность=143,6%) говорят о надежности детектирования. Из 322 гроз за весь период оперативных испытаний, технологией успешно детектировано 228, при этом на 50208 случаев, только 85 приходится на ложное детектирование гроз. При детальном рассмотрении результатов детектирования по субъектам зоны ответственности (Приложении 3, Таблица ПЗ.9), можно заметить, что 54,1% ложных срабатываний приходится на

Республику Алтай. Это может быть обусловлено сложными орографическими условиями, в связи с которыми происходит вынужденный подъем воздушных масс на высоты не характерные для остальных субъектов. Лучшее значение оправдываемости наблюдается на станциях, расположенных на территории Новосибирской области (91,48%). По совокупности оправдываемости и предупрежденности лидирует Томская область, здесь наблюдается наивысший показатель предупрежденности (82,19%) наряду с высоким показателем оправдываемости (89,55%). Критерий Пирси-Обухова, критерий надежности по Н. А. Багрову по всем субъектам говорят о надежности детектирования. Так, критерий Пирси-Обухова максимален для Томской области (82%) и минимален для Алтайского края (62%). Критерий надежности по Н. А. Багрову также имеет наивысшие значения по территории Томской области (86%), минимальное значение отмечается для территории Республики Алтай (53%), для всех субъектов значение этого критерия превышает порогового значения 0,33 и говорит о надежности детектирования.

Матрицы сопряженности для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»

Таблица П1.1 – Матрица сопряженности для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» при значении вероятности наличия грозы 50 %

Индекс станции	Название станции	Матрица сопряженности					Общая достоверность, %
		n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{00}	
23966	Ванжиль-Кынак	8	0	4	0	12	67
29016	Прохоркино	6	0	1	0	7	86
29023	Напас	13	0	4	0	17	76
29037	Березовка	1	0	2	0	3	33
29111	Средний Васюган	17	0	12	0	29	59
29122	Каргасок	7	0	8	0	15	47
29128	Парабель	11	0	13	0	24	46
29149	Степановка	19	0	4	0	23	83
29154	Усть-Озерное	11	4	3	0	18	61
29203	Новый Васюган	16	0	4	0	20	80
29209	Майск	7	0	4	0	11	64
29224	Старица	9	14	5	2	30	37
29237	Подгорное	13	0	1	0	14	93
29247	Батурино	16	4	7	0	27	59
29313	Пудино	13	0	1	0	14	93
29328	Бакчар	11	17	3	7	38	47
29332	Молчаново	12	0	4	0	16	75
29348	Первомайское	10	19	4	4	37	38
29355	Тегульдет	8	14	0	0	22	36
29405	Кыштовка	8	0	4	0	12	67
29418	Северное	15	0	6	0	21	71
29430	Томск	13	9	2	5	29	62
29500	Усть-Тарка	5	0	2	0	7	71
29508	Венгерово	10	0	2	0	12	83
29524	Крещенка	12	15	6	6	39	46
29532	Кожевниково	7	2	3	4	16	69
29536	Юрга	8	13	6	8	35	46
29539	Болотное	10	17	0	7	34	50
29540	Яя	5	21	2	8	36	36
29541	Тайга	11	15	4	9	39	51
29548	Барзас	11	21	2	6	40	43
29552	Тяжин	4	15	4	1	24	21
29557	Тисуль	12	18	3	1	34	38
29602	Чаны	13	0	5	0	18	72
29605	Татарск	10	12	2	3	27	48

Продолжение таблицы П 1.1

29613	Убинское	11	0	2	0	13	85
29624	Каргат	18	14	6	3	41	51
29625	Чулым	7	8	3	10	28	61
29626	Коченево	16	17	1	7	41	56
29631	Колывань	17	15	1	7	40	60
29632	Мошково	5	19	1	8	33	39
29636	Тогучин	6	25	2	5	38	29
29637	Учебная	12	9	4	8	33	61
29641	Топки	11	12	2	8	33	58
29644	Промышленная	12	24	1	7	44	43
29649	Крапивино	13	18	1	5	37	49
29654	Центральный рудник	23	0	0	0	23	100
29702	Чистоозерное	18	0	1	0	19	95
29706	Купино	10	0	3	0	13	77
29708	Баган	12	0	2	0	14	86
29712	Здвинск	7	0	3	1	11	73
29716	Довольное	12	18	1	7	38	50
29722	Ужаниха	13	17	4	6	40	48
29723	О.Дальний	7	10	5	7	29	48
29724	Кочки	18	10	2	3	33	64
29726	Ордынское	13	10	3	4	30	57
29730	Искитим	13	16	3	15	47	60
29735	Посевная	10	25	4	16	55	47
29736	Маслянино	14	26	2	13	55	49
29741	Красное	12	25	0	13	50	50
29745	Белово	6	29	2	14	51	39
29749	Киселевск им. Л.Р. и Н.А. Петровых	8	33	4	12	57	35
29813	Краснозерск	14	11	1	11	37	68
29814	Карасук	9	0	2	0	11	82
29816	Хабары	12	15	6	8	41	49
29822	Камень-на-Оби	9	14	1	7	31	52
29823	Сузун	17	24	3	8	52	48
29827	Баево	10	29	3	7	49	35
29832	Тальменка	11	38	1	10	60	35
29836	Заринск	7	30	1	24	62	50
29837	Шелаболиха	14	27	0	17	58	53
29846	Спиченково (Новокузнецк)	0	26	0	13	39	33
29848	Тогул	8	24	4	13	49	43
29849	Куздеево	12	14	6	12	44	55
29854	Междуреченск	11	0	0	0	11	100
29916	Благовещенка	12	8	8	5	33	52

Продолжение таблицы П 1.1

29928	Мамонтово	8	27	3	11	49	39
29936	Троицкое	15	20	3	20	58	60
29937	Алейская	6	19	4	14	43	47
29939	Бийск-Зональная	17	27	5	13	62	48
29941	Целинное	23	27	7	7	64	47
29946	Кондома	1	0	0	0	1	100
29954	Таштагол	22	0	0	0	22	100
29955	Усть-Кабырза	18	0	0	0	18	100
36020	Родио	10	14	5	4	33	42
36021	Ключи	12	13	1	8	34	59
36022	Волчиха	17	19	0	12	48	60
36024	Кулунда	19	19	2	4	44	52
36028	Угловское	12	21	0	12	45	53
36032	Поспелиха	7	19	2	9	37	43
36033	Шипуново	5	18	1	12	36	47
36034	Рубцовск	10	24	0	9	43	44
36036	Краснощеково	15	17	0	9	41	59
36038	Змеиногорск	18	0	2	0	20	90
36041	Усть-Чарышская пристань	8	18	1	11	38	50
36044	Усть-Калманка	11	16	1	10	38	55
36045	Солонешное	21	0	2	0	23	91
36047	Чарышское	13	0	2	0	15	87
36055	Кызыл-Озек	17	0	3	0	20	85
36057	Шебалино	23	0	2	0	25	92
36058	Чемал	28	0	2	0	30	93
36061	Турочак	17	0	2	0	19	89
36213	Усть-Кан	11	0	5	0	16	69
36229	Усть-Кокса	21	0	4	0	25	84
36231	Онгудай	23	0	0	0	23	100
36237	Катанда	23	0	2	0	25	92
36259	Кош-Агач	6	0	0	0	6	100
36442	Кара-Тюрек имени Р.Я. Гесса	3	0	0	0	3	100
36443	Ак-Кем	3	0	0	0	3	100

Таблица П1.2 – Матрицы сопряженности для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» при значении вероятности наличия грозы 60 %

Индекс станции	Название станции	Матрица сопряженности					Общая достоверность, %
		n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{00}	
23966	Ванжиль-Кынак	4	0	8	0	12	33
29016	Прохоркино	6	0	1	0	7	86
29023	Напас	10	0	7	0	17	59
29037	Березовка	0	0	3	0	3	0
29111	Средний Васюган	10	0	19	0	29	34
29122	Каргасок	5	0	10	0	15	33
29128	Парабель	8	0	16	0	24	33
29149	Степановка	18	0	5	0	23	78
29154	Усть-Озерное	11	4	3	0	18	61
29203	Новый Васюган	13	0	7	0	20	65
29209	Майск	6	0	5	0	11	55
29224	Старица	9	8	5	8	30	57
29237	Подгорное	11	0	3	0	14	79
29247	Батурино	10	2	13	2	27	44
29313	Пудино	12	0	2	0	14	86
29328	Бакчар	6	13	8	11	38	45
29332	Молчаново	9	0	7	0	16	56
29348	Первомайское	9	13	5	10	37	51
29355	Тегульдэт	7	9	1	5	22	55
29405	Кыштовка	7	0	5	0	12	58
29418	Северное	15	0	6	0	21	71
29430	Томск	11	6	4	8	29	66
29500	Усть-тарка	4	0	3	0	7	57
29508	Венгерово	8	0	4	0	12	67
29524	Крещенка	9	10	9	11	39	51
29532	Кожевниково	6	1	4	5	16	69
29536	Юрга	6	5	8	16	35	63
29539	Болотное	10	10	0	14	34	71
29540	Яя	5	12	2	17	36	61
29541	Тайга	9	8	6	16	39	64
29548	Барзас	7	10	6	17	40	60
29552	Тяжин	2	11	6	5	24	29
29557	Тисуль	8	13	7	6	34	41
29602	Чаны	12	0	6	0	18	67
29605	Татарск	8	5	4	10	27	67
29613	Убинское	10	0	3	0	13	77
29624	Каргат	14	7	10	10	41	59
29625	Чулым	6	5	4	13	28	68

Продолжение таблицы П 1.2

29626	Коченево	15	10	2	14	41	71
29631	Кольвань	13	9	5	13	40	65
29632	Мошково	3	13	3	14	33	52
29636	Тогучин	5	15	3	15	38	53
29637	Учебная	9	6	7	11	33	61
29641	Топки	8	6	5	14	33	67
29644	Промышленная	11	12	2	19	44	68
29649	Крапивино	10	9	4	14	37	65
29654	Центральный рудник	22	0	1	0	23	96
29702	Чистоозерное	12	0	7	0	19	63
29706	Купино	9	0	4	0	13	69
29708	Баган	11	0	3	0	14	79
29712	Здвинск	5	0	5	1	11	55
29716	Довольное	9	14	4	11	38	53
29722	Ужаниха	9	13	8	10	40	48
29723	О.Дальний	5	8	7	9	29	48
29724	Кочки	11	8	9	5	33	48
29726	Ордынское	13	6	3	8	30	70
29730	Искитим	9	9	7	22	47	66
29735	Посевная	7	17	7	24	55	56
29736	Маслянино	13	15	3	24	55	67
29741	Красное	12	15	0	23	50	70
29745	Белово	6	15	2	28	51	67
29749	Киселевск им. Л.Р. и Н.А. Петровых	8	22	4	23	57	54
29813	Краснозерск	12	9	3	13	37	68
29814	Карасук	9	0	2	0	11	82
29816	Хабары	10	9	8	14	41	59
29822	Камень-на-Оби	7	10	3	11	31	58
29823	Сузун	12	18	8	14	52	50
29827	Басво	9	25	4	11	49	41
29832	Тальменка	11	31	1	17	60	47
29836	Заринск	7	21	1	33	62	65
29837	Шелаболиха	13	19	1	25	58	66
29846	Спиченково (Новокузнецк)	0	17	0	22	39	56
29848	Тогул	8	12	4	25	49	67
29849	Кузедеево	12	8	6	18	44	68
29854	Междуреченск	9	0	2	0	11	82
29916	Благовещенка	8	4	12	9	33	52
29928	Мамонтово	7	18	4	20	49	55
29936	Троицкое	14	16	4	24	58	66
29937	Алейская	6	14	4	19	43	58

29939	Бийск-Зональная	16	20	6	20	62	58
29941	Целинное	18	19	12	15	64	52
29946	Кондома	1	0	0	0	1	100
29954	Таштагол	21	0	1	0	22	95
29955	Усть-Кабырза	18	0	0	0	18	100
36020	Родионо	9	8	6	10	33	58
36021	Ключи	10	7	3	14	34	71
36022	Волчиха	17	14	0	17	48	71
36024	Кулунда	14	13	7	10	44	55
36028	Угловское	12	15	0	18	45	67
36032	Поспелиха	7	12	2	16	37	62
36033	Шипуново	4	13	2	17	36	58
36034	Рубцовск	8	23	2	10	43	42
36036	Краснощеково	14	14	1	12	41	63
36038	Змеиногорск	17	0	3	0	20	85
36041	Усть-Чарышская пристань	8	13	1	16	38	63
36044	Усть-Калманка	11	12	1	14	38	66
36045	Солонешное	19	0	4	0	23	83
36047	Чарышское	10	0	5	0	15	67
36055	Кызыл-Озек	14	0	6	0	20	70
36057	Шебалино	20	0	5	0	25	80
36058	Чемал	26	0	4	0	30	87
36061	Турочак	17	0	2	0	19	89
36213	Усть-Кан	11	0	5	0	16	69
36229	Усть-Кокса	20	0	5	0	25	80
36231	Онгудай	23	0	0	0	23	100
36237	Катанда	22	0	3	0	25	88
36259	Кош-Агач	6	0	0	0	6	100
36442	Кара-Тюрек имени Р.Я Гесса	2	0	1	0	3	67
36443	Ак-Кем	3	0	0	0	3	100

Таблица П1.3 – Матрицы сопряженности для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» при значении вероятности наличия грозы 70 %

Индекс станции	Название станции	Матрица сопряженности					Общая достоверность, %
		n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{00}	
23966	Ванжиль-Кынак	0	0	12	0	12	0
29016	Прохоркино	3	0	4	0	7	43
29023	Напас	9	0	8	0	17	53
29037	Березовка	0	0	3	0	3	0
29111	Средний васюган	8	0	21	0	29	28
29122	Каргасок	4	0	11	0	15	27
29128	Парабель	6	0	18	0	24	25
29149	Степановка	14	0	9	0	23	61
29154	Усть-озерное	7	4	7	0	18	39
29203	Новый васюган	7	0	13	0	20	35
29209	Майск	6	0	5	0	11	55
29224	Старица	9	7	5	9	30	60
29237	Подгорное	8	0	6	0	14	57
29247	Батурино	8	0	15	4	27	44
29313	Пудино	11	0	3	0	14	79
29328	Бакчар	5	7	9	17	38	58
29332	Молчаново	6	0	10	0	16	38
29348	Первомайское	6	4	8	19	37	68
29355	Тегульдет	6	4	2	10	22	73
29405	Кыштовка	7	0	5	0	12	58
29418	Северное	10	0	11	0	21	48
29430	Томск	10	5	5	9	29	66
29500	Усть-Тарка	3	0	4	0	7	43
29508	Венгерово	5	0	7	0	12	42
29524	Крещенка	9	6	9	15	39	62
29532	Кожевниково	6	1	4	5	16	69
29536	Юрга	5	4	9	17	35	63
29539	Болотное	8	7	2	17	34	74
29540	Яя	4	6	3	23	36	75
29541	Тайга	7	7	8	17	39	62
29548	Барзас	6	4	7	23	40	73
29552	Тяжин	1	5	7	11	24	50
29557	Тисуль	5	5	10	14	34	56
29602	Чаны	9	0	9	0	18	50
29605	Татарск	6	2	6	13	27	70
29613	Убинское	7	0	6	0	13	54
29624	Каргат	8	5	16	12	41	49
29625	Чулым	6	2	4	16	28	79

Продолжение таблицы П 1.3

29626	Коченево	14	6	3	18	41	78
29631	Колывань	11	3	7	19	40	75
29632	Мошково	2	5	4	22	33	73
29636	Тогучин	5	7	3	23	38	74
29637	Учебная	8	1	8	16	33	73
29641	Топки	7	4	6	16	33	70
29644	Промышленная	10	5	3	26	44	82
29649	Крапивино	9	3	5	20	37	78
29654	Центральный рудник	16	0	7	0	23	70
29702	Чистоозерное	12	0	7	0	19	63
29706	Купино	8	0	5	0	13	62
29708	Баган	8	0	6	0	14	57
29712	Здвинск	3	0	7	1	11	36
29716	Довольное	4	9	9	16	38	53
29722	Ужаниха	7	8	10	15	40	55
29723	О.Дальний	3	3	9	14	29	59
29724	Кочки	9	5	11	8	33	52
29726	Ордынское	12	2	4	12	30	80
29730	Искитим	7	4	9	27	47	72
29735	Посевная	5	8	9	33	55	69
29736	Маслянино	12	8	4	31	55	78
29741	Красное	10	9	2	29	50	78
29745	Белово	6	8	2	35	51	80
29749	Киселевск им. Л.Р. и Н.А. Петровых	8	13	4	32	57	70
29813	Краснозерск	6	7	9	15	37	57
29814	Карасук	8	0	3	0	11	73
29816	Хабары	9	5	9	18	41	66
29822	Камень-на-Оби	6	5	4	16	31	71
29823	Сузун	12	11	8	21	52	63
29827	Басво	8	14	5	22	49	61
29832	Тальменка	8	18	4	30	60	63
29836	Заринск	6	13	2	41	62	76
29837	Шелаболиха	10	13	4	31	58	71
29846	Спиченково (Новокузнецк)	0	9	0	30	39	77
29848	Тогул	8	9	4	28	49	73
29849	Кузедеево	9	7	9	19	44	64
29854	Междуреченск	7	0	4	0	11	64
29916	Благовещенка	6	2	14	11	33	52
29928	Мамонтово	6	8	5	30	49	73
29936	Троицкое	10	11	8	29	58	67
29937	Алейская	5	8	5	25	43	70

Продолжение таблицы П 1.3

29939	Бийск-Зональная	12	8	10	32	62	71
29941	Целинное	15	8	15	26	64	64
29946	Кондома	1	0	0	0	1	100
29954	Таштагол	20	0	2	0	22	91
29955	Усть-Кабырза	17	0	1	0	18	94
36020	Родино	7	6	8	12	33	58
36021	Ключи	10	4	3	17	34	79
36022	Волчиха	14	8	3	23	48	77
36024	Кулунда	12	7	9	16	44	64
36028	Угловское	12	11	0	22	45	76
36032	Поспелиха	6	5	3	23	37	78
36033	Шипуново	3	6	3	24	36	75
36034	Рубцовск	8	17	2	16	43	56
36036	Краснощеково	12	10	3	16	41	68
36038	Змеиногорск	15	0	5	0	20	75
36041	Усть-Чарышская пристань	8	10	1	19	38	71
36044	Усть-Калманка	10	7	2	19	38	76
36045	Солонешное	16	0	7	0	23	70
36047	Чарышское	10	0	5	0	15	67
36055	Кызыл-Озек	12	0	8	0	20	60
36057	Шебалино	19	0	6	0	25	76
36058	Чемал	26	0	4	0	30	87
36061	Турочак	12	0	7	0	19	63
36213	Усть-Кан	11	0	5	0	16	69
36229	Усть-Кокса	20	0	5	0	25	80
36231	Онгудай	23	0	0	0	23	100
36237	Катанда	20	0	5	0	25	80
36259	Кош-Агач	6	0	0	0	6	100
36442	Кара-Тюрек имени Р.Я. Гесса	1	0	2	0	3	33
36443	Ак-Кем	3	0	0	0	3	100

Таблица П1.4 – Матрицы сопряженности для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» при значении вероятности наличия грозы 80 %

Индекс станции	Название станции	Матрица сопряженности					Общая достоверность, %
		n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{00}	
23966	Ванжиль-Кынак	0	0	12	0	12	0
29016	Прохоркино	2	0	5	0	7	29
29023	Напас	7	0	10	0	17	41
29037	Березовка	0	0	3	0	3	0
29111	Средний васюган	4	0	25	0	29	14
29122	Каргасок	1	0	14	0	15	7
29128	Парабель	4	0	20	0	24	17
29149	Степановка	8	0	15	0	23	35
29154	Усть-Озерное	2	1	12	3	18	28
29203	Новый Васюган	5	0	15	0	20	25
29209	Майск	4	0	7	0	11	36
29224	Старица	8	3	6	13	30	70
29237	Подгорное	6	0	8	0	14	43
29247	Батурино	7	0	16	4	27	41
29313	Пудино	7	0	7	0	14	50
29328	Бакчар	4	3	10	21	38	66
29332	Молчаново	6	0	10	0	16	38
29348	Первомайское	3	0	11	23	37	70
29355	Тегульдет	4	2	4	12	22	73
29405	Кыштовка	4	0	8	0	12	33
29418	Северное	7	0	14	0	21	33
29430	Томск	8	1	7	13	29	72
29500	Усть-Тарка	3	0	4	0	7	43
29508	Венгерово	5	0	7	0	12	42
29524	Крещенка	5	1	13	20	39	64
29532	Кожевниково	6	0	4	6	16	75
29536	Юрга	5	3	9	18	35	66
29539	Болотное	7	4	3	20	34	79
29540	Яя	4	1	3	28	36	89
29541	Тайга	6	1	9	23	39	74
29548	Барзас	4	1	9	26	40	75
29552	Тяжин	0	1	8	15	24	63
29557	Тисуль	5	1	10	18	34	68
29602	Чаны	8	0	10	0	18	44
29605	Татарск	4	2	8	13	27	63
29613	Убинское	4	0	9	0	13	31
29624	Каргат	6	2	18	15	41	51
29625	Чулым	3	0	7	18	28	75

Продолжение таблицы П 1.4

29626	Коченево	10	5	7	19	41	71
29631	Колывань	8	0	10	22	40	75
29632	Мошково	2	2	4	25	33	82
29636	Тогучин	3	2	5	28	38	82
29637	Учебная	5	0	11	17	33	67
29641	Топки	6	1	7	19	33	76
29644	Промышленная	7	3	6	28	44	80
29649	Крапивино	6	1	8	22	37	76
29654	Центральный рудник	12	0	11	0	23	52
29702	Чистоозерное	9	0	10	0	19	47
29706	Купино	8	0	5	0	13	62
29708	Баган	7	0	7	0	14	50
29712	Здвинск	3	0	7	1	11	36
29716	Довольное	2	6	11	19	38	55
29722	Ужаниха	7	4	10	19	40	65
29723	О.Дальний	3	2	9	15	29	62
29724	Кочки	8	4	12	9	33	52
29726	Ордынское	3	1	13	13	30	53
29730	Искитим	5	4	11	27	47	68
29735	Посевная	3	4	11	37	55	73
29736	Маслянино	8	4	8	35	55	78
29741	Красное	8	4	4	34	50	84
29745	Белово	5	3	3	40	51	88
29749	Киселевск им. Л.Р. и Н.А. Петровых	6	7	6	38	57	77
29813	Краснозерск	5	3	10	19	37	65
29814	Карасук	6	0	5	0	11	55
29816	Хабары	7	2	11	21	41	68
29822	Камень-на-Оби	6	2	4	19	31	81
29823	Сузун	11	4	9	28	52	75
29827	Басво	3	7	10	29	49	65
29832	Тальменка	8	8	4	40	60	80
29836	Заринск	6	7	2	47	62	85
29837	Шелаболиха	9	8	5	36	58	78
29846	Спиченково (Новокузнецк)	0	5	0	34	39	87
29848	Тогул	7	3	5	34	49	84
29849	Кузедеево	7	3	11	23	44	68
29854	Междуреченск	6	0	5	0	11	55
29916	Благовещенка	5	0	15	13	33	55
29928	Мамонтово	5	3	6	35	49	82
29936	Троицкое	9	8	9	32	58	71
29937	Алейская	5	3	5	30	43	81

Продолжение таблицы П 1.4

29939	Бийск-Зональная	10	3	12	37	62	76
29941	Целинное	11	2	19	32	64	67
29946	Кондома	1	0	0	0	1	100
29954	Таштагол	16	0	6	0	22	73
29955	Усть-Кабырза	16	0	2	0	18	89
36020	Родино	6	4	9	14	33	61
36021	Ключи	9	2	4	19	34	82
36022	Волчиха	14	3	3	28	48	88
36024	Кулунда	9	5	12	18	44	61
36028	Угловское	12	7	0	26	45	84
36032	Поспелиха	4	3	5	25	37	78
36033	Шипуново	2	4	4	26	36	78
36034	Рубцовск	8	11	2	22	43	70
36036	Краснощеково	8	6	7	20	41	68
36038	Змеиногорск	11	0	9	0	20	55
36041	Усть-Чарышская пристань	6	4	3	25	38	82
36044	Усть-Калманка	10	3	2	23	38	87
36045	Солонешное	15	0	8	0	23	65
36047	Чарышское	8	0	7	0	15	53
36055	Кызыл-Озек	12	0	8	0	20	60
36057	Шебалино	16	0	9	0	25	64
36058	Чемал	24	0	6	0	30	80
36061	Турочак	8	0	11	0	19	42
36213	Усть-Кан	8	0	8	0	16	50
36229	Усть-Кокса	16	0	9	0	25	64
36231	Онгудай	21	0	2	0	23	91
36237	Катанда	19	0	6	0	25	76
36259	Кош-Агач	6	0	0	0	6	100
36442	Кара-Тюрек имени Р.Я. Гесса	1	0	2	0	3	33
36443	Ак-Кем	1	0	2	0	3	33

Таблица П1.5 – Матрицы сопряженности для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» при значении вероятности наличия грозы 90 %

Индекс станции	Название станции	Матрица сопряженности					Общая достоверность, %
		n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{00}	
23966	Ванжиль-Кынак	0	0	12	0	12	0
29016	Прохоркино	0	0	7	0	7	0
29023	Напас	3	0	14	0	17	18
29037	Березовка	0	0	3	0	3	0
29111	Средний васюган	1	0	28	0	29	3
29122	Каргасок	0	0	15	0	15	0
29128	Парабель	1	0	23	0	24	4
29149	Степановка	1	0	22	0	23	4
29154	Усть-Озерное	1	0	13	4	18	28
29203	Новый Васюган	3	0	17	0	20	15
29209	Майск	2	0	9	0	11	18
29224	Старица	7	0	7	16	30	77
29237	Подгорное	2	0	12	0	14	14
29247	Батурино	3	0	20	4	27	26
29313	Пудино	4	0	10	0	14	29
29328	Бакчар	3	2	11	22	38	66
29332	Молчаново	3	0	13	0	16	19
29348	Первомайское	1	0	13	23	37	65
29355	Тегульдет	1	0	7	14	22	68
29405	Кыштовка	3	0	9	0	12	25
29418	Северное	6	0	15	0	21	29
29430	Томск	6	0	9	14	29	69
29500	Усть-Тарка	2	0	5	0	7	29
29508	Венгерово	2	0	10	0	12	17
29524	Крещенка	2	0	16	21	39	59
29532	Кожевниково	3	0	7	6	16	56
29536	Юрга	2	0	12	21	35	66
29539	Болотное	2	0	8	24	34	76
29540	Яя	1	0	6	29	36	83
29541	Тайга	2	1	13	23	39	64
29548	Барзас	1	0	12	27	40	70
29552	Тяжин	0	0	8	16	24	67
29557	Тисуль	4	0	11	19	34	68
29602	Чаны	7	0	11	0	18	39
29605	Татарск	3	0	9	15	27	67
29613	Убинское	2	0	11	0	13	15
29624	Каргат	1	1	23	16	41	41
29625	Чулым	1	0	9	18	28	68

Продолжение таблицы П 1.5

29626	Коченево	5	0	12	24	41	71
29631	Колывань	6	0	12	22	40	70
29632	Мошково	1	1	5	26	33	82
29636	Тогучин	1	1	7	29	38	79
29637	Учебная	1	0	15	17	33	55
29641	Топки	4	0	9	20	33	73
29644	Промышленная	3	2	10	29	44	73
29649	Крапивино	1	0	13	23	37	65
29654	Центральный рудник	7	0	16	0	23	30
29702	Чистоозерное	6	0	13	0	19	32
29706	Купино	5	0	8	0	13	38
29708	Баган	2	0	12	0	14	14
29712	Здвинск	2	0	8	1	11	27
29716	Довольное	1	1	12	24	38	66
29722	Ужаниха	5	2	12	21	40	65
29723	О.Дальний	2	0	10	17	29	66
29724	Кочки	7	0	13	13	33	61
29726	Ордынское	3	0	13	14	30	57
29730	Искитим	4	2	12	29	47	70
29735	Посевная	3	2	11	39	55	76
29736	Маслянино	5	0	11	39	55	80
29741	Красное	5	0	7	38	50	86
29745	Белово	5	1	3	42	51	92
29749	Киселевск им. Л.Р. и Н.А. Петровых	4	2	8	43	57	82
29813	Краснозерск	5	1	10	21	37	70
29814	Карасук	5	0	6	0	11	45
29816	Хабары	3	0	15	23	41	63
29822	Камень-на-Оби	3	0	7	21	31	77
29823	Сузун	6	0	14	32	52	73
29827	Басво	2	1	11	35	49	76
29832	Тальменка	4	3	8	45	60	82
29836	Заринск	4	0	4	54	62	94
29837	Шелаболиха	6	2	8	42	58	83
29846	Спиченково (Новокузнецк)	0	0	0	39	39	100
29848	Тогул	4	0	8	37	49	84
29849	Кузедеево	5	0	13	26	44	70
29854	Междуреченск	5	0	6	0	11	45
29916	Благовещенка	4	0	16	13	33	52
29928	Мамонтово	4	1	7	37	49	84
29936	Троицкое	7	1	11	39	58	79
29937	Алейская	4	1	6	32	43	84

Продолжение таблицы П 1.5

29939	Бийск-Зональная	6	1	16	39	62	73
29941	Целинное	10	0	20	34	64	69
29946	Кондома	1	0	0	0	1	100
29954	Таштагол	10	0	12	0	22	45
29955	Усть-Кабырза	12	0	6	0	18	67
36020	Родино	3	1	12	17	33	61
36021	Ключи	6	0	7	21	34	79
36022	Волчиха	12	1	5	30	48	88
36024	Кулунда	8	1	13	22	44	68
36028	Угловское	8	3	4	30	45	84
36032	Поспелиха	3	1	6	27	37	81
36033	Шипуново	1	1	5	29	36	83
36034	Рубцовск	6	2	4	31	43	86
36036	Краснощеково	5	0	10	26	41	76
36038	Змеиногорск	6	0	14	0	20	30
36041	Усть-Чарышская пристань	4	0	5	29	38	87
36044	Усть-Калманка	7	1	5	25	38	84
36045	Солонешное	7	0	16	0	23	30
36047	Чарышское	1	0	14	0	15	7
36055	Кызыл-Озек	9	0	11	0	20	45
36057	Шебалино	12	0	13	0	25	48
36058	Чемал	16	0	14	0	30	53
36061	Турочак	7	0	12	0	19	37
36213	Усть-Кан	7	0	9	0	16	44
36229	Усть-Кокса	10	0	15	0	25	40
36231	Онгудай	17	0	6	0	23	74
36237	Катанда	10	0	15	0	25	40
36259	Кош-Агач	6	0	0	0	6	100
36442	Кара-Тюрек имени Р.Я. Гесса	1	0	2	0	3	33
36443	Ак-Кем	0	0	3	0	3	0

Значения общей оправдываемости атмосферных явлений
для метеостанций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»

№ п/п	Индекс ВМО	Наименование станции	Атмосферное явление									Среднее значение общей оправдываемости (ОО, %)	
			Дождь	Морось	Снег	Снег мокрый	Дождь ливневый слабый	Дождь ливневый умеренный	Дождь ливневый сильный	Снег ливневый	Крупа снежная		Снег ливневый мокрый
1	23966	Ванжиль-Кынак		71			87	81				87	82
2	29023	Напас		79			85	86		79	72	86	81
3	29111	Средний Васюган	77	80		89	86	88	88	81		87	85
4	29154	Усть-Озерное	77		89		79	82		82			82
5	29313	Пудино	76	72	89		83	85		84		86	82
6	29328	Бакчар					86	82	84	77		88	83
7	29348	Первомайское		76			84	83		79	70	87	80
8	29418	Северное	75				85	82		81		91	83
9	29430	Томск	74			91	88	86	78	78		88	83
10	29539	Болотное					79	84	82	78		91	83
11	29541	Тайга		74			88	86	84	82	71	87	82
12	29557	Тисуль	81				87	84		79		90	84
13	29605	Татарск					80	85	82	85		90	84
14	29822	Камень-на-Оби	82				83	86				86	84
15	29849	Кузедеево	79		85	91	88	88	86	80	75	88	84
16	29939	Бийск-Зональная					87	88	81	78	72	86	82
17	36034	Рубцовск	84		88	88	82	86		84		83	85
18	36038	Змеиногорск					87	81		79	73	87	81
19	36045	Солонешное	78		86	92	85	87		79	69	86	83
20	36055	Кызыл-Озек					81	87	86	83		86	85
21	36229	Усть-Кокса					86	85	83	82		88	85
22	36259	Кош-Агач					84	82	85	84			84
23	36442	Кара-Тюрек имени Р.Я. Гесса					85	80		79			81

Таблица ПЗ.1 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% над станцией для всей территории.

Месяц	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Апрель	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Май	12	0	3	214	229	100	80	98,68	0,8	0,88	180
Июнь	6	1	3	53	63	85,71	66,6	93,65	0,65	0,71	152,3
Июль	18	8	10	215	251	69,23	64,28	92,82	0,6	0,62	133,5
Август	12	0	11	197	220	100	52,2	95	0,52	0,66	152,1
Сентябрь	1	2	0	322	325	33,3	100	99,38	0,99	0,49	133,3
За период испытаний	49	11	27	1001	1088	77,6	72,6	95,9	0,7	0,7	150,2

Таблица ПЗ.2 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% над станцией по субъектам РФ

Субъект	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Томская область	19	0	5	355	359	100	79,2	98,6	0,49	0,62	179,1
Новосибирская область	8	2	8	310	328	80	50	96,95	0,49	0,6	130
Кемеровская область	6	2	5	225	238	75	54,5	97,05	0,53	0,62	129,5
Алтайский край	11	6	8	155	180	64,7	57,89	92,22	0,54	0,57	122,6
Республика Алтай	5	2	2	82	91	71,42	71,42	95,6	0,69	0,69	142,8

Таблица ПЗ.3 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% в радиусе 30 км от станции для всей территории.

Месяц	n11	n12	n21	n22	np	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Апрель	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Май	31	9	17	914	971	77,5	64,58	97,32	0,64	0,69	142
Июнь	28	9	3	285	325	75,67	90,3	96,3	0,87	0,8	165,9
Июль	85	82	21	929	1117	50,89	80,18	90,77	0,72	0,57	131
Август	60	7	17	867	951	89,55	77,92	97,47	0,77	0,82	167,4
Сентябрь	1	10	0	1295	1306	9,9	100	99,23	0,99	0,16	109
За период испытаний	205	117	58	4290	4670	60,7	82,6	96,2	0,8	0,6	143,1

Таблица ПЗ.4 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% в радиусе 30 км от станции по субъектам РФ

Субъект	n11	n12	n21	n22	np	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Томская область	54	13	14	1210	1291	80,59	79,41	97,9	0,78	0,78	160
Новосибирская область	51	28	15	1427	1521	64,55	77,27	97,17	0,75	0,68	141,8
Кемеровская область	31	14	9	1016	1070	68,88	77,5	97,85	0,76	0,72	146,3
Алтайский край	46	22	16	783	867	67,64	74,19	95,61	0,71	0,68	141,8
Республика Алтай	23	42	5	416	486	35,38	82,14	90,32	0,73	0,45	117,5

Таблица ПЗ.5 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования ливневых осадков над станцией для всей территории.

Месяц	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Апрель	71	1	23	10	105	98,61	75,53	77,14	0,66	0,35	174,1
Май	130	4	66	29	229	97,01	66,32	69,43	0,54	0,3	163,3
Июнь	41	2	13	7	63	95,3	75,9	76,19	0,54	0,35	171,2
Июль	103	15	55	78	251	87,28	65,18	72,11	0,49	0,45	152,4
Август	66	21	51	82	220	75,86	56,41	67,27	0,36	0,35	132,2
Сентябрь	203	18	82	22	325	91,85	71,22	69,23	0,26	0,155	163
За период испытаний	614	61	290	228	1193	91,0	68,4	71,9	0,5	0,3	159,4

Таблица ПЗ.6 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования ливневых осадков над станцией по субъектам РФ

Субъект	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Томская область	180	14	99	66	359	92,78	64,51	68,52	0,47	0,34	157,2
Новосибирская область	147	17	85	79	328	89,63	63,36	68,9	0,45	0,38	152,9
Кемеровская область	122	19	49	48	238	86,52	71,34	71,42	0,43	0,38	157,8
Алтайский край	102	8	47	23	180	92,72	68,45	69,44	0,43	0,28	161,1
Республика Алтай	36	3	40	12	91	92,3	47,36	52,74	0,27	0,13	139,6

Таблица ПЗ.7 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования ливневых осадков в радиусе 50 км от станции для всей территории.

Месяц	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Апрель	382	41	87	54	564	90,3	81,44	77,3	0,38	0,32	171,7
Май	651	67	162	103	983	90,66	80,07	76,7	0,41	0,33	170,7
Июнь	258	17	34	26	335	93,81	88,35	84,77	0,49	0,42	182,1
Июль	657	144	119	214	1134	82	84,66	76,8	0,44	0,45	166,6
Август	433	206	66	250	955	67,76	86,77	71,51	0,415	0,42	154,5
Сентябрь	1065	137	88	27	1317	88,6	92,36	82,91	0,08	0,1	180,9
За период испытаний	3446	612	556	674	5288	85,5	85,6	78,3	0,4	0,3	171,1

Таблица ПЗ.8 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования ливневых осадков в радиусе 50 км от станции по субъектам РФ

Субъект	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Томская область	883	163	128	118	1292	84,41	87,33	77,47	0,29	0,3	171,7
Новосибирская область	985	162	156	245	1548	85,87	86,32	79,45	0,46	0,47	172,2
Кемеровская область	651	155	90	187	1083	80,76	87,85	77,37	0,42	0,44	168,6
Алтайский край	608	72	109	88	877	89,41	84,79	79,36	0,39	0,36	174,2
Республика Алтай	321	61	74	36	492	84,03	81,26	72,56	0,18	0,17	165,2

Таблица ПЗ.9 – Матрицы сопряженности и статистические характеристики оправдываемости детектирования гроз с вероятностью >80% над станцией по субъектам РФ, по данным WAREP

Субъект	n11	n12	n21	n22	nn	Оправд-ость	Пред-ость	Общая оправд-ость	Критерий Пирси-Обухова	Критерий надежности по Н.А. Багрову	Оправдываемость + Предупрежденность
Томская область	60	7	13	11345	11425	89,55	82,19	99,82	0,82	0,86	171,7
Новосибирская область	43	4	20	14874	14941	91,48	68,25	99,83	0,68	0,78	159,7
Кемеровская область	42	12	18	8344	8416	77,8	70	99,6	0,7	0,73	147,7
Алтайский край	48	16	29	11455	11548	75	62,3	99,6	0,62	0,68	137,3
Республика Алтай	35	46	14	3780	3875	43,2	71,42	98,45	0,7	0,53	114,6

