

Мониторинг снежного покрова по данным радиометра SEVIRI КА серии Meteosat

Волкова Е. В., Дерюгина В. В., Кухарский А. В., Невский А. А.

*ФГБУ «НИЦ «Планета»
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д.7.
E-mail: quantocosa@bk.ru*

Снежный покров играет важную роль в формировании гидрологического и энергетического балансов территории. Информация о нём крайне важна для сельского хозяйства (например, для прогноза сохранности озимых культур в зимнее время, увлажнения почв при его таянии и др.). Границы залегания снежного покрова обычно не сильно меняются в течение суток, поэтому для наблюдений за ними достаточно ежесуточных наблюдений. По суточным региональным картам снежно-ледового покрова можно строить, например, карты повторяемости снега или продолжительности его залегания в течение холодного периода года как для конкретного года, так и климатические.

Наземные измерения на агрометеорологических станциях позволяют наблюдать за снегом точно, т.е. на станции и в её ближайших окрестностях. Кроме того, наземная сеть метеорологических наблюдений за снегом неравномерно распределена по поверхности суши. Спутниковые наблюдения для многих территорий являются единственным источником информации о снежном покрове и, кроме того, дают возможность осуществлять мониторинг изменчивости границ снежного покрова. Однако они имеют и ряд ограничений: например, невозможность наблюдать за снегом сквозь облака и под деревьями (особенно хвойных пород), а также то, что оценки получаются в среднем для площади пиксела, т.е. если снегом занята меньшая часть пиксела (растаял в некоторых местах или в его пределах находилось много бесснежных территорий (дороги, лес, др.)), то пиксел по спутниковым данным будет считаться без снега, а если наоборот, большая часть пиксела занята снегом, то весь пиксел будет считаться покрытым снегом.

В ФГБУ «НИЦ «Планета» разработан автоматизированный программный комплекс (АПК) «SNOWsevex» (на основе АПК «SEVIRIexeter» [1, 2]), предназначенный для оперативного мониторинга снежного покрова по данным радиометра SEVIRI КА серии Meteosat. Помимо спутниковой информации (каналы 1-10 SEVIRI/Meteosat) в АПК используются данные прогностической модели Exeter (Великобритания, сетка 2,5°, сроки 0 и 12 ч UTC), а также числовой рельеф (gtopo30 (<http://eros.usgs.gov>)). В основе АПК лежит оригинальная авторская пороговая методика дешифрирования облачности по косвенным признакам. Эмпирические пороговые решения являются линейными и

нелинейными функциями от географической широты места, высоты места над уровнем моря, высоты солнца над горизонтом, угла спутникового визирования, приземной температуры воздуха (T_a) и приведённой к уровню моря, а также максимальной в атмосферном столбе и на некоторых барических уровнях и др.

В процессе работы АПК «SNOWsevex» для отдельных сроков спутниковых наблюдений определяет облачную маску по данным измерений альбедо (каналы 1-3 радиометра SEVIRI/Meteosat) и радиационной температуры (каналы 4-7, 9, 10), в том числе их разностей ((A_2-A_1) , $(T_{10}-T_7)$, (T_4-T_9) , (T_6-T_5)) и для безоблачных пикселей в светлое время суток детектирует снег, используя данные о A_1 , T_9 и T_a . Для остальных безоблачных пикселей определяется вероятность существования снежного покрова, т.е. у поверхности земли существуют или нет условия для наличия снега (низкие значения T_a и T_9). В светлое время суток для детектирования снежного покрова используются «альбедные» и «температурные» предикторы, в ночное – только «температурные». Альбедные предикторы непосредственно «видят» снег, а температурные – только регистрируют условия, необходимые для существования снежного покрова. Поэтому в дневное время для безоблачных пикселей проводится классификация на 3 класса (вероятность наличия снега 100 %, >0 % и 0 %), а в ночное время только на 2 класса (вероятность наличия снега >0 % и 0 %). Таким образом, АПК в течение суток детектирует 4 класса объектов: облачно, безоблачно/снег, безоблачно/вероятно снег, безоблачно/без снега.

Используя результаты «срочных» наблюдений, АПК «SNOWsevex» строит суточные монтажи снежно-ледового покрова сперва для каждого КА Meteosat, а затем для двух КА, если оба прибора захватывают заданную территорию, используя основные синоптические сроки (т.е. 8 раз в сутки: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч UTC). При построении суточных монтажей для каждого КА «срочные» карты последовательно накладываются друг на друга так, чтобы найти как можно больше безоблачных пикселей и определить для них вероятность наличия снежного покрова. Если в течение суток хотя бы за 1 срок наблюдения в пикселе отмечался 100 % снег, то этот класс будет и в монтаже. Класс «облачно» на монтаже означает, что в течение суток этот пиксел ни разу не был безоблачным. 100% бесснежным пиксел будет только, если в течение суток в пикселе всегда были бесснежные условия. В остальных случаях пиксел будет считаться сомнительным, т.е. с ненулевой вероятностью наличия снега/льда. В результате на «суточных» монтажах облачностью занято меньше пикселей, чем на каждой «срочной» карте, в течение суток, и больше пикселей (в холодный период года) свидетельствуют о наличии снежно-ледового покрова (100% или вероятного).

Аналогично при построении суточных монтажей по двум КА. На данные одного КА накладываются данные второго КА также как описано выше для суточных монтажей по одному КА, т.е. так, чтобы вторая карта «закрывала» (дешифрировала) как можно больше облачных пикселей, заменяя их на безоблачные со снегом (приоритетно) или без.

Выходные продукты АПК – бинарные матрицы со значения кодов классов и соответствующие им растровые карты. «Срочные» наблюдения и суточные монтажи для каждого КА за снежным покровом получаются для полного круга обзора или его фрагмента прибора SEVIRI/Meteosat с исходным разрешением, на регулярной сетке или для любой картографической проекции, заданной матрицей координат, а для двух КА – для общего региона на регулярной сетке или заданного матрицей. Зона обзора радиометра SEVIRI/Meteosat: угол спутникового визирования не более $7,7^\circ$ или $\pm 69^\circ$ широты/долготы вокруг точки стояния.

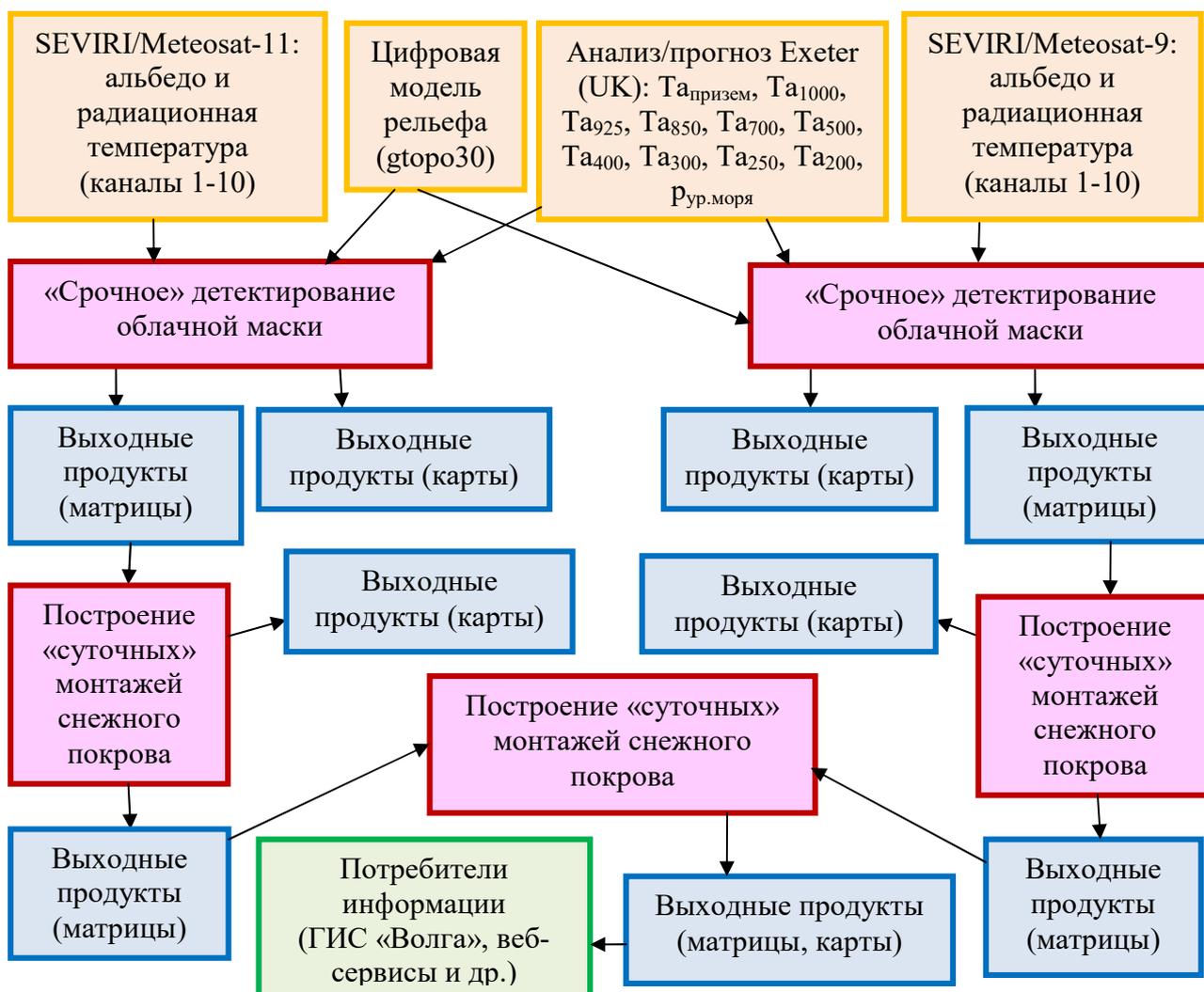


Рисунок 1. Технологическая схема работы АПК «SNOWsevex» для двух КА

АПК «SNOWsevex» работает в автоматическом или ручном режиме в 3 этапа (на рис. 1 показана технологическая схема для двух КА) и запускается 1 раз в сутки.

Суточные монтажи строятся по срочным спутниковым картам для 8-ми основных синоптических сроков: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч UTC.

На всех трёх видах карт («срочные» и суточные монтажи по одному или двум КА) в искусственных цветах показаны 4 класса объектов: 1- облачно, 2- безоблачно/снег/лёд, 3- безоблачно/возможно снег, 4- безоблачно/без снега (см. рис. 2-4).

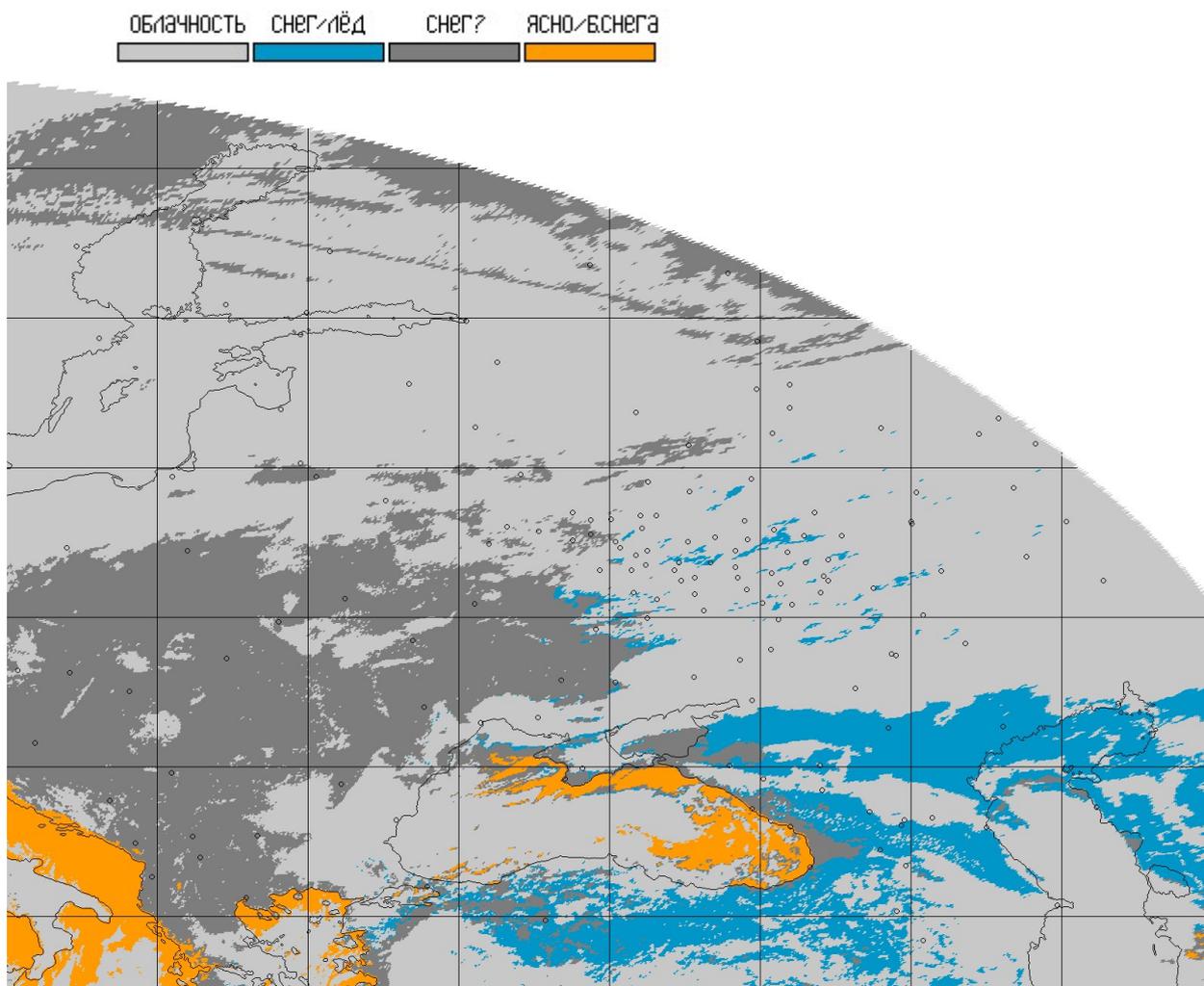


Рис.2. «Срочная» классификация (SEVIRI/Meteosat-11, 0° в.д., 30 января 2024 г., 6:00 UTC)

Другими словами, 4 класса это: 1- «облачно» (большая часть пиксела занята облачностью и о состоянии подстилающей поверхности невозможно судить точно); 2- «безоблачно/снег/лёд» (пиксел преимущественно безоблачный и скорее всего (вероятность ~100 %) со снегом или льдом на поверхности земли и/или на деревьях); 3- «безоблачно/снег?» (пиксел преимущественно безоблачный, на поверхности земли присутствуют условия для его существования, но снег по каким-то причинам невиден (например, под деревьями, ночью и др.), вероятность наличия снега от 0 до 100 %); 4- «безоблачно/без снега» (пиксел преимущественно безоблачный и скорее всего без снега

(вероятность наличия снега ~ 0 %)). В класс №3 также попадают ситуации со шлейфом выпадающего снега из облаков, но не на подстилающей поверхности (например, над незамёрзшими водоёмами) или когда радиационные характеристики облаков близки к снежному покрову (т.е. ошибочная ситуация со снегом, но там на самом деле облако), а также ситуации, когда в течение дня хотя бы 1 раз пиксел был сомнителен с точки зрения наличия снега, а всё остальное время он был бесснежным. Таким образом, класс №2 несколько занижает зоны со снежным покровом, но снег там есть практически со 100 % уверенностью, а класс №3, наоборот, несколько завышает зоны с возможным снежным покровом. Класс №4 практически 100 % без снега, а класс №1 – о наличии снега неизвестно из-за экранирования облаками.

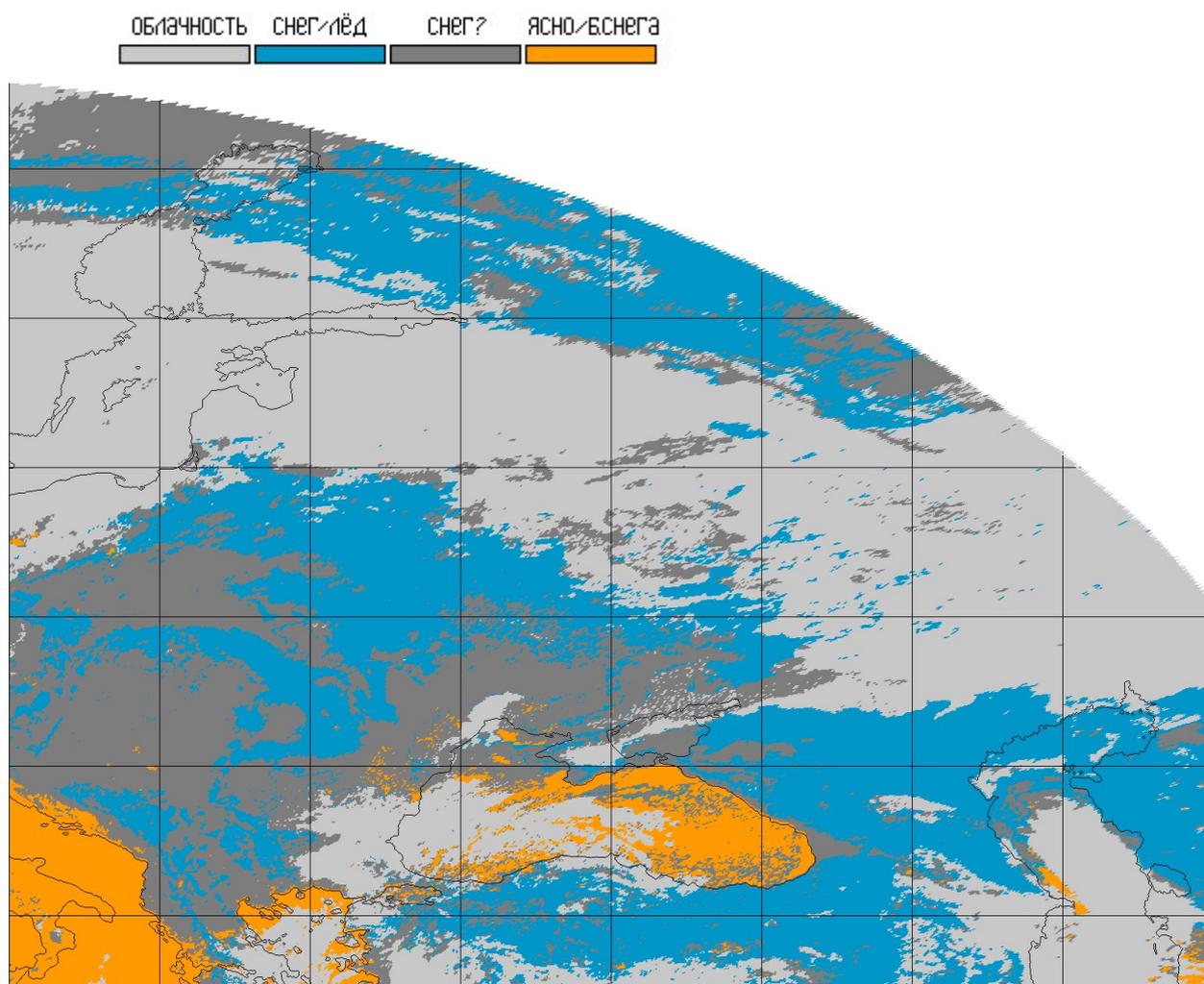


Рис.3. Суточный монтаж (SEVIRI/Meteosat-11, 0° в.д., 30 января 2024 г., сроки 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч UTC)

Для валидации карт снежного покрова наземными наблюдениями на метеостанциях за высотой снежного покрова был разработан универсальный АПК «SNOWvalid» предназначен для автоматической оперативной ежедневной и ежемесячной валидации

спутниковых карт вероятности снежного покрова (4 класса: облачно, безоблачно/снег/лёд, безоблачно/вероятно снег, безоблачно/без снега) в нормальной равнопромежуточной цилиндрической проекции, получаемых по данным любого спутникового прибора, результатами наземных наблюдений за высотой снежного покрова на метеостанциях. Выходные продукты АПК «SNOWvalid» получают ежедневно в виде растровых карт вероятности снежного покрова с нанесёнными на них в виде специальных значков наземными метеонаблюдениями (см. рис. 5-а-б) и в виде текстовых журналов с оценками точности спутниковой классификации в среднем по заданной территории за сутки, а также ежемесячно (за прошедший или заданный календарный месяц) в виде текстовых журналов с оценками точности спутниковой классификации в среднем по заданной территории в среднем за месяц.

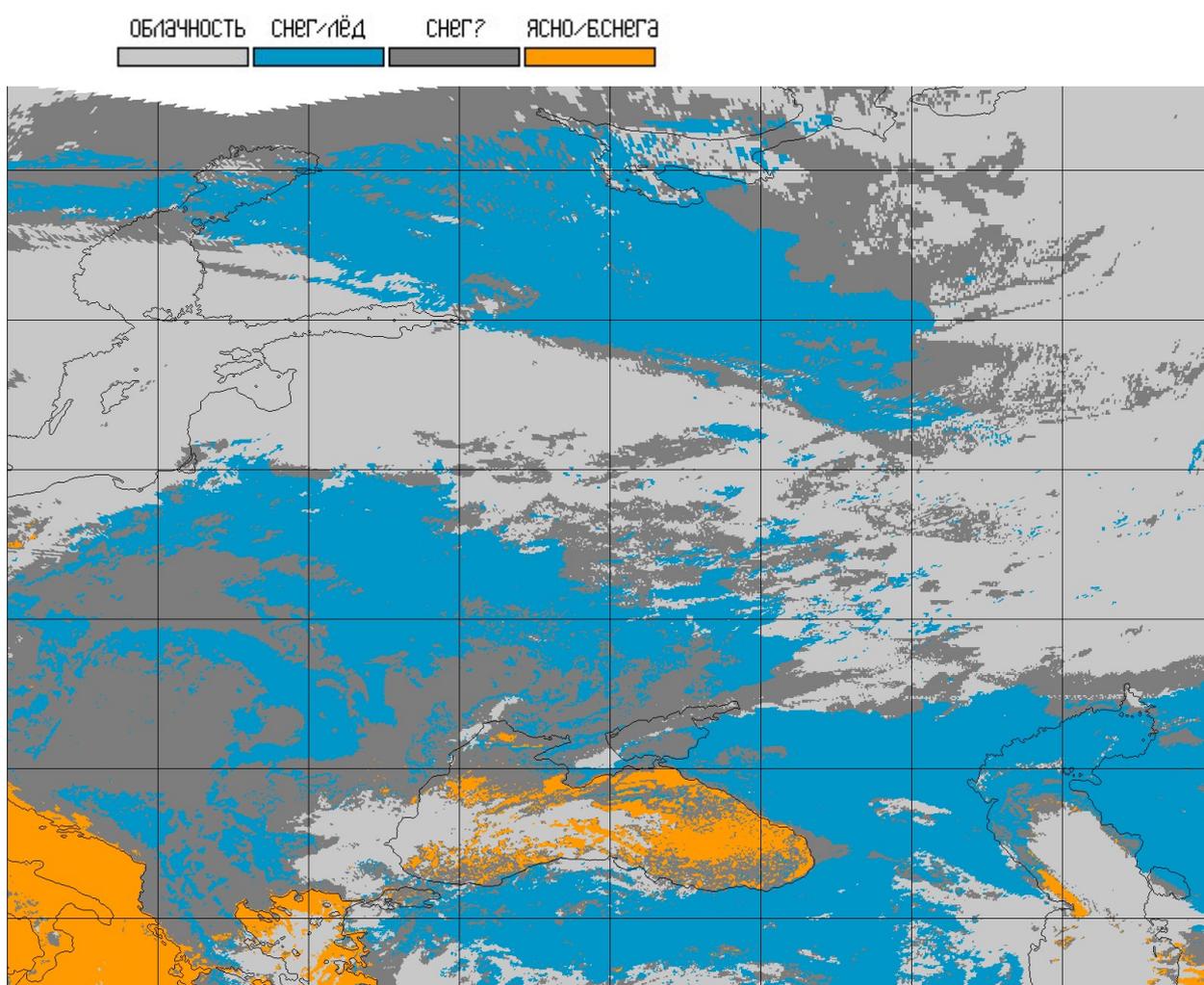


Рис.4. Суточный монтаж (SEVIRI/Meteosat-11, 0° в.д. и SEVIRI/Meteosat-9, $45,5^\circ$ в.д., 30 января 2024 г., сроки 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч UTC)

В процессе работы АПК «SNOWvalid» для каждой метеостанции вырезает фрагмент (размером $N \times N$ пикселей) классифицированного спутникового изображения (с

центром в метеостанции) и в его пределах находит аналогичное состояние снежного покрова. Затем рассчитывается статистика: POD (Probability of Detection) – вероятность правильного детектирования класса, т.е. количество совпавших пикселей данного класса относительно количества пикселей этого класса по наземным данным; POO (Probability of Occurrence) – вероятность правильного распознавания класса, т.е. количество совпавших пикселей данного класса относительно количества пикселей этого класса по спутниковым данным; HR (Hit Rate) – точность классификации, т.е. общее количество совпавших пикселей относительно размера выборки, для 2х (без снега и снег/лёд) и 3х (без снега, вероятно снег и снег/лёд) классов. По итогам валидации АПК выдаёт автоматическое заключение о качестве валидации (по каждому классу «безоблачно» и суммарно по 3м классам). Для этого значения характеристик точности сравниваются с табличными пороговыми значениями. Каждое сравниваемое значение характеристики приравнивается к классу «отлично» (excellent), «хорошо» (good), «удовлетворительно» (satisfactory), «плохо» (bad) или «очень плохо» (awful) («no data» означает отсутствие случаев данного класса) и ему присваивается значение в баллах (соответственно классу от 5 до 1), которые затем суммируются и делятся на количество характеристик, а затем округляются до целого значения.

Была проведена валидация суточных монтажей по двум КА Meteosat за январь-май 2024 г. данными наземных наблюдений на метеостанциях за высотой снежного покрова (телеграммы SYNORMAK за 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч UTC (метеоданные АСООИ ГМЦ в кодах КН-01 из БД ГМЦ России)). Получены следующие результаты валидации для 5ти месяцев (январь-май) 2024 г. (152 дня, 254564 наземных наблюдений) для региона (40-67° с.ш. и 15-95° в.д.) для 4х классов («без снега», «вероятно снег», «снег/лёд» и двойного класса «снег+вероятно снег») (пример визуальной валидации см. на рис. 5-а): POD соответственно 49, 75, 52 и 97 %, POO – 85, 61, 76 и 50 %, HR для 2х классов («без снега» и «снег») 58 %, для 3х классов («без снега», «вероятно снег» и «снег») 86 % (размеры вырезаемых вокруг метеостанции фрагментов 11x11 пикселей (см. рис. 5-а)). Автоматическое заключение как для каждого из 3х классов («без снега», «вероятно снег» и «снег»), так и суммарно для 3х классов – «хорошо». В зимние месяцы точность классификации классов «вероятно снег» и «снег/лёд» выше, чем весной, а класса «без снега» – ниже (см. рис. 6-8).

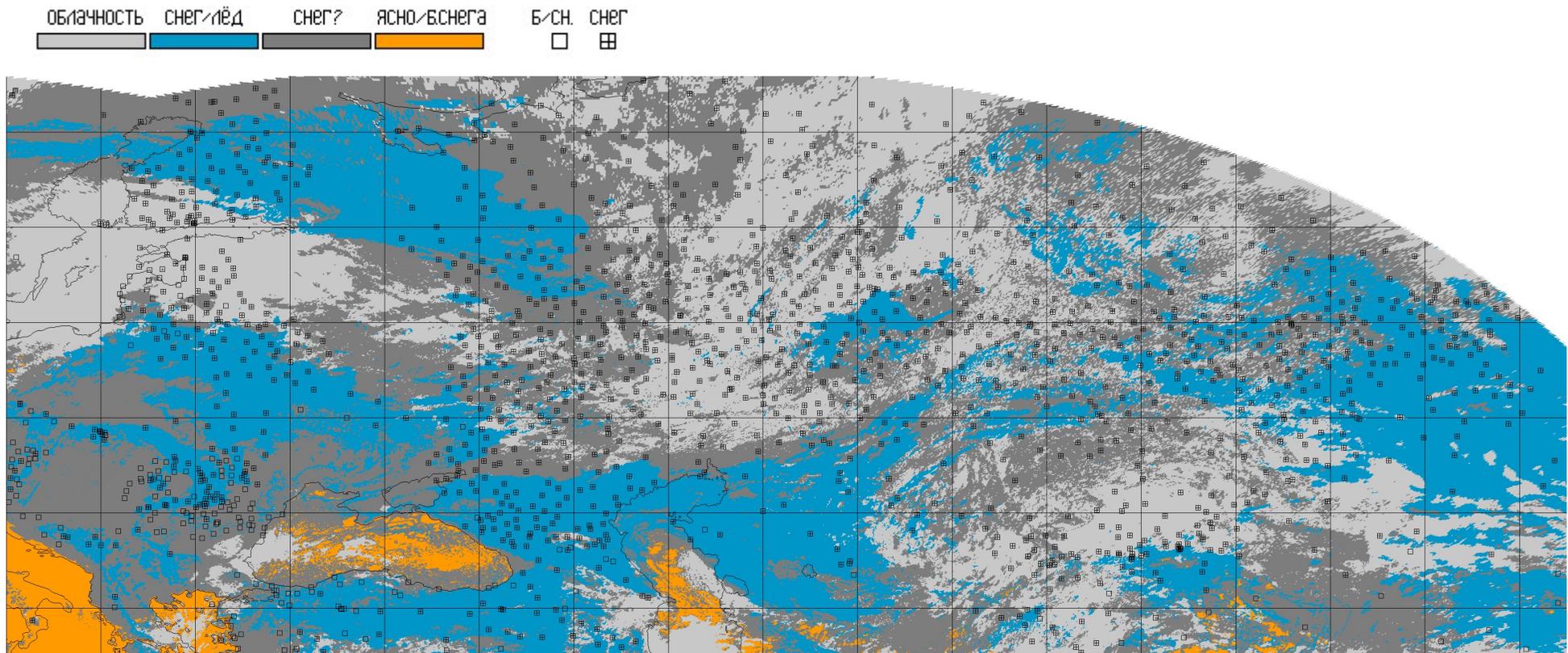


Рис.5-а. Пример визуальной валидации данными SYNOPMAK(суточный монтаж SEVIRI/Meteosat-11, 0° в.д. и SEVIRI/Meteosat-9, 45,5° в.д.,31 января 2024 г., сроки 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч UTC, размеры значков 11x11 пикселей)

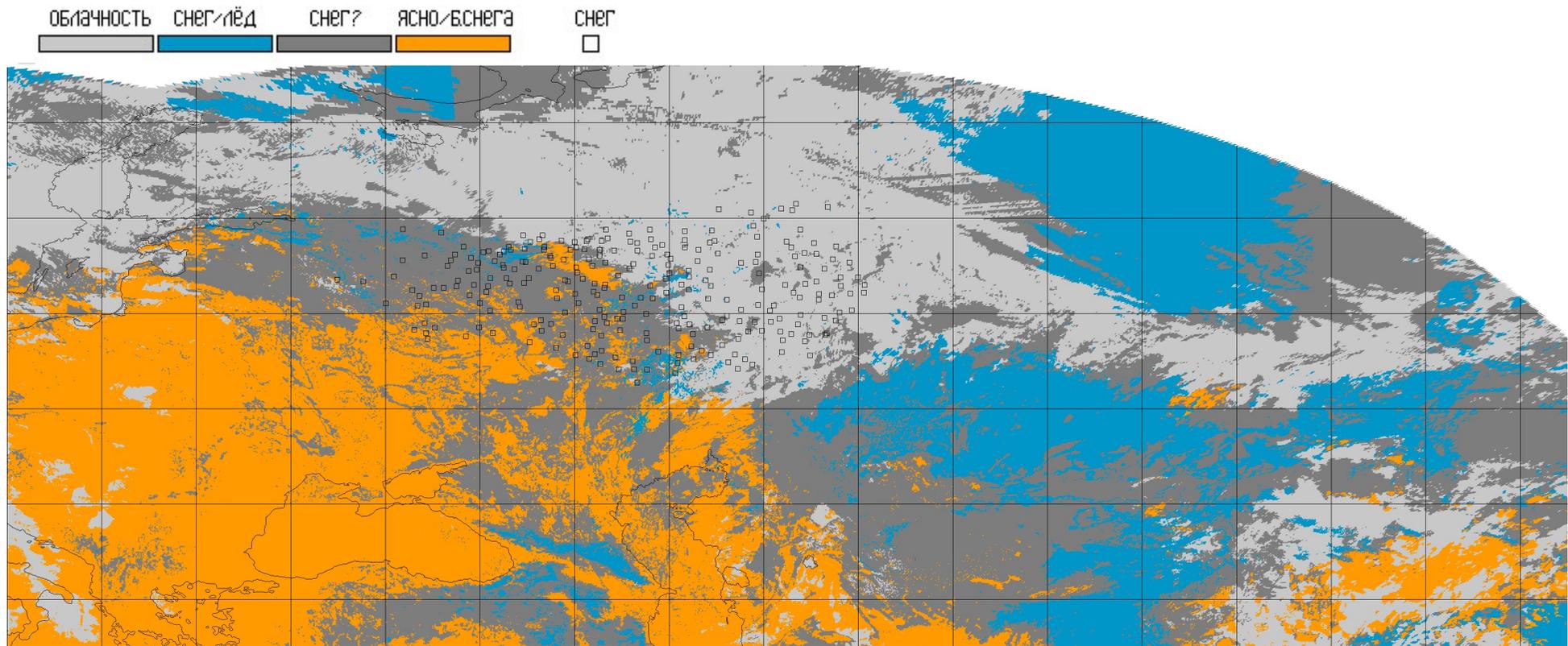


Рис.5-б. Пример визуальной валидации данными снегомерных постов (суточный монтаж SEVIRI/Meteosat-11, 0° в.д. и SEVIRI/Meteosat-9, 45,5° в.д., 31 марта 2024 г., размеры значков 11x11 пикселей)

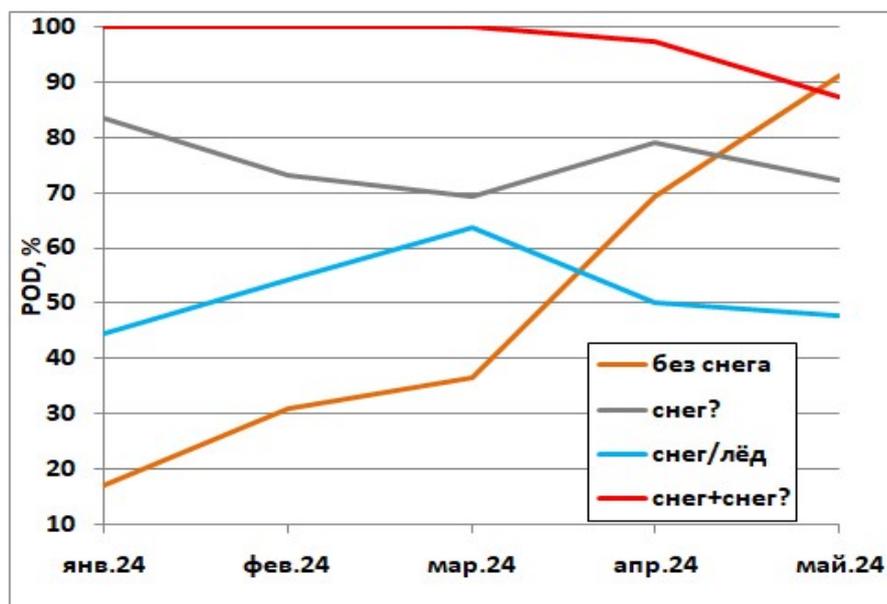


Рис.6. «Годовой» ход средних за месяц значений POD

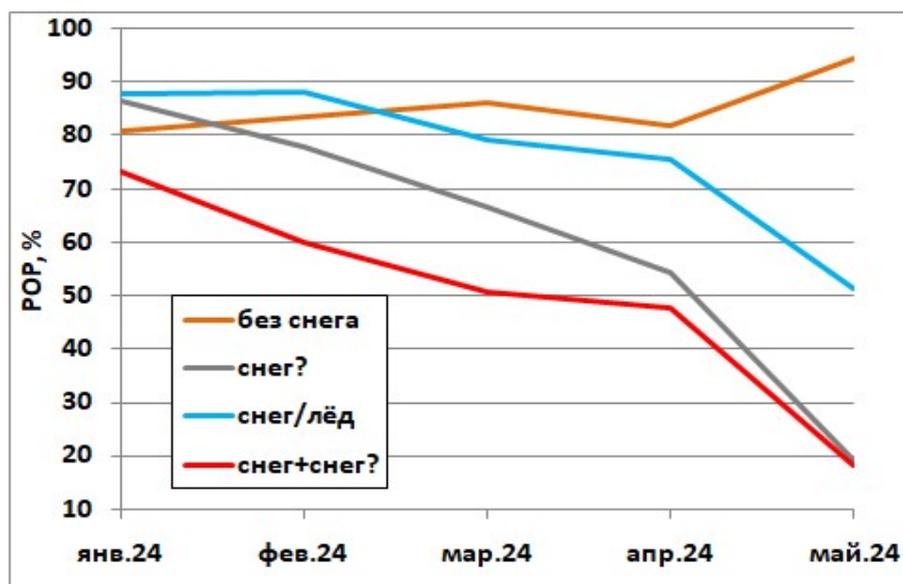


Рис.7. «Годовой» ход средних за месяц значений POO



Рис.8. «Годовой» ход средних за месяц значений HR для 2х и 3х классов «безоблачно»

Таким образом, вероятность правильного детектирования двойного класса «снег+вероятно снег» зимой составляет ~100 %, вероятность существования каждого из 3х класса возле метеостанции (POD) с января по апрель – не ниже 60 %, вероятность события «снег» в выделенной зоне (РОО для классов «снег», «вероятно снег» и «снег+вероятно снег») с января по апрель не ниже 50 %, а средняя за месяц точность классификации на 3 класса вероятности снежного покрова колеблется между 80 и 90 %, т.е. точность методики действительно хорошая.

Дополнительно была поведена валидация спутниковой классификации вероятности снежного покрова наземными наблюдениями за высотой снежного покрова и на сети снегомерных маршрутов за январь-май 2024 г. (21 день, 4308 наземных наблюдений, пример визуальной валидации см. на рис. 5-б). В процессе валидации вокруг заданных координат снегомерного пункта вырезался фрагмент размером NxN пикселей (N=3, 5, 7, 9, 11 пикселей) и в его пределах происходил поиск пикселя со снегом и/или вероятным снегом. Рассчитывались значения POD для двух классов: «снег» и «снег+вероятно снег». Анализ полученных результатов (см. рис. 9) показал, что:

- значения POD для класса «снег» всегда заметно ниже (20-70 % в зависимости от размера фрагмента), чем для двойного класса «снег+вероятно снег» (95-100 %), преимущественно из-за эффекта «экранирования» снежного покрова (см. выше);

- для класса «снег» значения POD были заметно ниже в январе (из-за устойчивого антициклона снег растаял на деревьях и др.) и апреле-мае (из-за неоднородности снежного покрова в процессе таяния снега), а для двойного класса «снег+вероятно снег» – в апреле;

- значения POD существенно зависят от размеров вырезаемого фрагмента – чем он меньше, тем меньше значения POD для обоих классов.

В среднем за 4 месяца для класса «снег» значения POD в зависимости от размеров фрагмента (3, 5, 7, 9, 11 пикселей) соответственно 52, 54, 55, 57 и 59 % (т.е. не ниже 50 %), а для класса «снег+вероятно снег» соответственно 99,4, 99,6, 99,7, 99,8 и 99,9 % (т.е. ~100 %). С одной стороны, использование маленьких фрагментов более точно отражает ситуацию непосредственно вокруг заданной точки, однако, учитывая эффект экранирования снега (см. выше) и большие размеры пикселя (осреднение информации в его пределах), при анализе территории вокруг поста можно точнее проанализировать состояние снежного покрова. Так, на рис. 5-б видно, что началось таяние снега (разорванность снежных полей) и в пределах пикселя преобладают территории без снега, поэтому по спутниковым данным пиксел причисляется к классу «без снега», однако отдельные «снежные» пиксели в окрестностях поста указывают на то, что снежный покров возможен и в заданной точке.

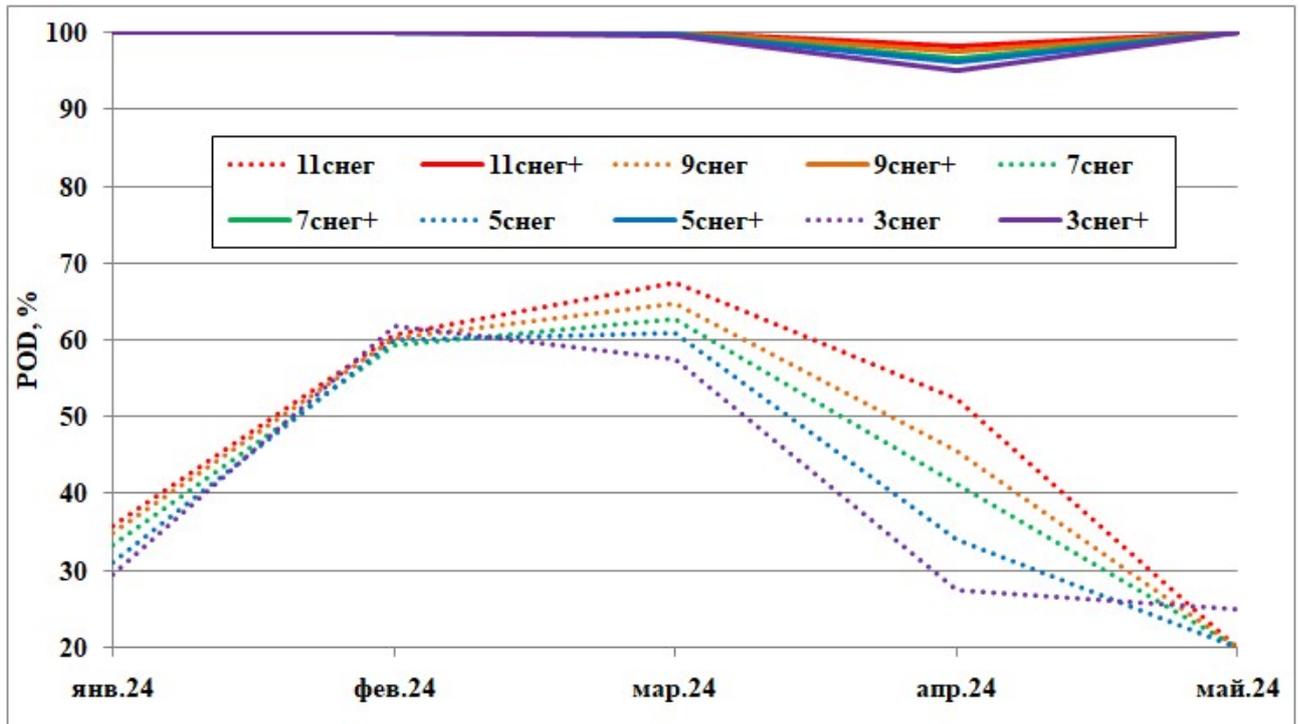


Рис.9. «Годовой» ход средних за месяц значений HR для 2х классов: «снег» и «снег/вероятно снег»

Таким образом, валидация карт вероятности снежного покрова двумя способами показала высокую точность получаемого спутникового продукта.

В 2019 г. Гидрометцентром России и НИЦ «Планета» была разработана система мониторинга и прогнозирования гидрометеорологической обстановки в бассейне р. Волга («ГИС Волга») [3, 4]. Информационная система «ГИС Волга» создана на основе ГИС-ВЕБ технологий. В систему в виде веб-сервисов поступают данные Гидрометцентра России (гидрологические, метеорологические и агрометеорологические данные, информация снегомерных маршрутов с сети Росгидромета, метеорологический прогноз,-прогноз уровней и притока вод в водохранилища бассейна р. Волга), а также результаты спутниковой классификации с веб-сервисов НИЦ «Планета». Развитие спутниковой компоненты в «ГИС Волга» началось с 2020 г. Для данных высокого и среднего разрешения с российских и зарубежных КА, принимаемых в зоне радиовидимости европейского центра НИЦ «Планета» на собственные приёмные станции, были созданы растровые хранилища и база геоданных промышленного образца. Автоматическое пополнение актуальной спутниковой информацией баз геоданных реализовано с помощью авторских специализированных программ. Как только данные попадают в базу, они тут же становятся доступными для пользователей. Для быстрой визуализации информации в системе к данным применялся ряд нестандартных процедур обработки и оптимизации. Доступ к данным в системе «ГИС Волга» осуществляется через веб-приложение с помощью обычного веб-браузера (при этом

не требуется дополнительное специализированное программное обеспечение). Система «ГИС Волга» ориентирована на широкий круг потребителей, в том числе органы исполнительной власти: МЧС России (НЦУКС и др.), Минобороны России (ГМС ВС РФ и др.). Двенадцать подразделений Росгидромета уже ежедневно используют систему в рабочем процессе.

С 2024 г. ГИС «Волга» дополнен спутниковым продуктом «Карты снежного покрова по данным SEVIRI/Meteosat» (3 класса объектов: облака, безоблачно/без снега, безоблачно/снег). Класс «безоблачно/без снега» в ГИС «Волга» включает в себя 2 класса с карт вероятности снежного покрова: безоблачно/без снега и безоблачно/вероятно снег (см. рис. 10), т.е. этот класс необязательно без снега: снег может присутствовать, но экранироваться, например, деревьями.

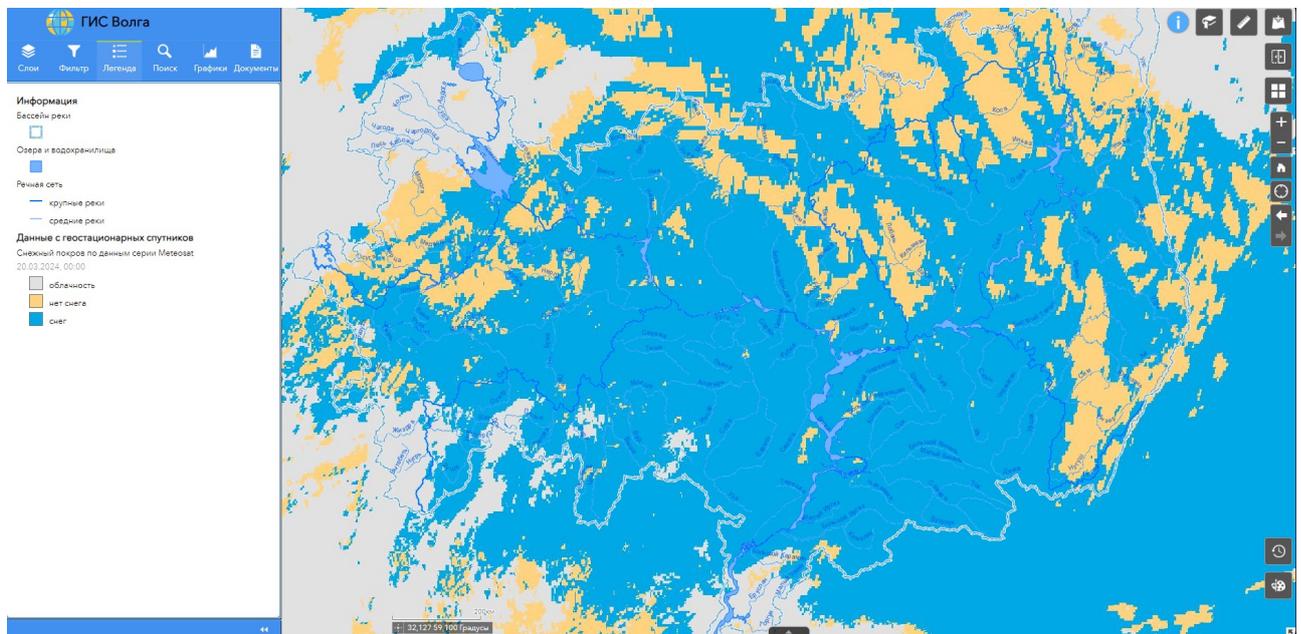


Рис.10. Пример карты снежного покрова в ГИС «Волга» (20 марта 2024 г.)

Литература

1. Волкова Е.В. Использование информации радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat для мониторинга количества облачного покрова // Сборник тезисов Шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2018 г. С. 164. ISBN 978-5-00015-018-4. doi:10.21046/2070-16DZZconf-2018a.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ МЕТЕОСАТ-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16-22.
3. Дерюгина В.В., Василенко Е.В., Кровотынцев В.А., Кухарский А.В. // Технологические решения при создании спутникового сегмента информационной системы

мониторинга наводнений в бассейне р. Волга/ Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 40-47.
DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-40-47

4. Дерюгина В.В., Симонов Ю.А., Леонтьева Е.А., Невский А.А.// Веб- ГИС-технологии обработки и анализа спутниковых данных и гидрологических измерений и для мониторинга и прогнозирования паводковой обстановки в бассейне р. Волги / Материалы сборника VI Международной научно-практической конференции: «Комплексные проблемы техносферной безопасности» в 3 ч. Воронеж, 2021. С. 80-92.