

УДК 628.08; 628.8; 630*4

**С. Л. Кравцов¹, М. А. Ильючик², Д. В. Голубцов¹, А. Л. Козел¹,
А. А. Пушкин³, И. Л. Савко¹, К. А. Романович¹**

¹ Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
² ЛРУП «Белгослес»

³ Белорусский государственный технологический университет

ПРОГНОЗНЫЙ МОНИТОРИНГ РАЗВИТИЯ ОЧАГОВ КОРоеДА-ТИПОГРАФА В НАСАЖДЕНИЯХ ЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ

Ель является одной из наиболее ценных древесных пород в лесах Республики Беларусь. Имея, как правило, поверхностное расположение корневой системы, она особенно сильно страдает от засухи. В последние десятилетия темпы этого губительного явления значительно ускорились вследствие роста среднегодовой температуры воздуха (изменения климата). Усыхание насаждений ели сопровождается вспышками массового размножения короеда-типографа, в результате которых происходит гибель деревьев ели, часто на огромных территориях. Такие усыхания приводят к радикальным нарушениям в структуре насаждений ели на больших площадях, неблагоприятным экологическим и экономическим последствиям.

Поражение насаждений ели короедом-типографом нельзя предотвратить, однако его последствия могут быть значительно уменьшены за счет использования более качественного прогнозного мониторинга. Разработанная методика прогнозного мониторинга развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели содержит пространственную и временную составляющие. Пространственная составляющая прогнозирования (отражающая местоположение очагов) развития короеда-типографа основана на анализе засушливых условий за длительный период времени; временная составляющая прогнозирования (отражающая возникновение, развитие и затухание очагов) – на анализе данных с метеостанций: температура воздуха, суммы среднесуточных температур воздуха. На базе разработанной методики создана система прогнозного мониторинга развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели. Сравнение результатов полевого обследования за 2019 г. и результатов прогнозного мониторинга развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели показало хорошее соответствие.

Ключевые слова: насаждения ели, короед-типограф, методика, система, прогнозный мониторинг.

Для цитирования: Кравцов С. Л., Ильючик М. А., Голубцов Д. В., Козел А. Л., Пушкин А. А., Савко И. Л., Романович К. А. Прогнозный мониторинг развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели с использованием спутниковых и наземных данных // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 65–72.

**S. L. Krautsou¹, M. A. Il'yuchik², D. V. Golubtsov¹, A. L. Kozel¹,
A. A. Pushkin³, I. L. Savko¹, K. A. Romanovich¹**

¹ United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
² FIRUE “Belgosles”

³ Belarusian State Technological University

FORECAST MONITORING OF THE SPREAD OF THE BARK BEETLE-TYPOGRAPHER IN SPRUCE PLANTING WITH USING SATELLITE AND GROUND DATA

Spruce is one of the most valuable tree species in the forests of Belarus. Having, as a rule, a superficial location of the root system, spruce suffers especially from drought. In recent decades, the rate of this destructive phenomenon has accelerated significantly due to an increase in average annual air temperature (climate change). The drying up of spruce planting is accompanied by outbreaks of mass reproduction of a bark beetle-typographer, as a result of which, the death of spruce planting occurs, often over vast territories. Such dryings lead to radical disturbances in the structure of spruce planting on large areas, adverse ecological and economic consequences.

The defeat of spruce by the bark beetle-typographer cannot be prevented, however, its consequences can be significantly reduced through the use of better forecast monitoring. The methodology for forecast monitoring the spread of lesions of spruce planting by a bark beetle-typographer contains spatial and

temporal components. The spatial component of forecasting (reflecting the location of the lesions) is based on the analysis of dry conditions over a long period of time. The temporal component of forecasting (reflecting the emergence, development and attenuation of the lesions) is based on the analysis of data from meteorological stations: air temperature, the sum of average daily air temperatures. On the basis of developed methodology, the system for forecast monitoring the lesions spread of spruce planting by a bark beetle-typographer was created. The comparison of the results of the field survey for 2019 and the results of predictive monitoring the spread of lesions of spruce planting by a bark beetle-typographer showed a good correspondence.

Key words: spruce planting, typographer bark beetle, system, forecast monitoring.

For citation: Krautsou S. L., Il'yuchik M. A., Golubtsov D. V., Kozel A. L., Pushkin A. A., Savko I. L., Romanovich K. A. Forecast monitoring of the spread of the bark beetle-typographer in spruce planting with using satellite and ground data. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2022, no. 1 (252), pp. 65–72 (In Russian).

Введение. Ель является одной из наиболее ценных древесных пород в лесах Республики Беларусь. По состоянию на 01.01.2021 г. в лесном фонде она занимала площадь 771,3 тыс. га, что составляет 9,3% от площади всех лесов [1]. На территории страны ель произрастает повсеместно, чаще образуя смешанные леса.

Корневая система ели, как правило, имеет поверхностное расположение [2, 3, 4] – мощная, густо переплетенная, она расположена преимущественно горизонтально на глубине до 30 см. В соответствии с этим ель особенно сильно страдает от засухи. Усыханию подвержены приспевающие, спелые и перестойные насаждения, в основном от 60 до 70 лет суходольных типов леса, доля которых в Республике Беларусь составляет 23%, или 63 млн м³.

Хотя для Республики Беларусь проблема усыхания насаждений ели не нова, в последние десятилетия темпы этого губительного явления значительно ускорились вследствие роста среднегодовой температуры воздуха (изменения климата). Усыхание насаждений ели сопровождается вспышками массового размножения короеда-типографа [4], в результате которых происходит гибель насаждений ели, часто на огромных территориях. В частности, в 2012 г. это послужило причиной формирования пандемических очагов короеда-типографа и вызвало гибель насаждений ели на площади 5583,4 га с объемом 1855,8 тыс. м³; в 2013 г. – на площади 5907,8 га с объемом 1997,9 тыс. м³. Такие усыхания приводят к радикальным нарушениям в структуре насаждений ели на больших площадях, неблагоприятным экологическим и экономическим последствиям: гибель наиболее ценных и продуктивных насаждений ели в возрасте от 50 лет и старше может достигать 70% и более, потери больших объемов деловой древесины из-за несвоевременного освоения в полном объеме.

Поражение насаждений ели короедом-типографом нельзя предотвратить, однако его последствия могут быть значительно уменьшены (на 10–20%) за счет использования более

качественного прогнозного мониторинга для поддержки принятия управленческих решений по назначению соответствующих лесохозяйственных мероприятий с целью снижения потерь деловой древесины и получения максимального экономического эффекта от ведения лесного хозяйства.

Основная часть. Методика прогнозного мониторинга. Благодаря высоким миграционным способностям и «умению» отыскивать кормовой материал короед-типограф практически всегда заселяет нужные ему деревья и тем самым сохраняет популяцию даже при низком уровне численности. В результате в каждом насаждении ели всегда находится пусть даже немногочисленная популяция короеда-типографа [5].

Важнейшим фактором, определяющим динамику численности короеда-типографа и состояние насаждений ели, являются погодные условия, оказывающие воздействие на короеда-типографа через состояние деревьев, а также через темпы его развития и эффективность энтомофагов, уничтожающих короеда в стадии молодого жука. В годы засух (особенно повторных) резко возрастает опасность перерастания локальных очагов в пандемические, охватывающие огромные территории.

В прогнозном мониторинге развития короеда-типографа выделены пространственная и временная составляющие (рис. 1). Пространственная составляющая прогнозирования развития (отражающая местоположение) очагов короеда-типографа основана на анализе засушливых условий.

При этом особенностями являются:

– необходимость анализа индексов засухи. Действительно, возникновение, развитие и затухание очагов короеда-типографа во многом сопряжены с изменением устойчивости насаждений ели, ключевым фактором которого является засуха. При этом индексы засухи, полученные по данным с метеостанций (в частности, гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова),

характеризуются грубым масштабом (рассчитываются путем интерполяции значений, полученных в местоположении метеостанций – расстояние между ними составляет 30–50 км) и низкой периодичностью (для гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова – 30 сут). Поэтому дополнительно учитываются индексы, полученные по спутниковым данным (индекс состояния растительности VCI (Vegetation Condition Index, VCI), индекс температурного состояния TCI (Temperature Condition Index, TCI) и вегетационно-температурный индекс VTI (Vegetation-

Temperature Index, VTI)) [6–9] – они отличаются более высокими пространственным разрешением (250 м) и временным разрешением (8 сут);
– проведение анализа данных за длительный период – несколько лет. Действительно, засуха может длиться от одного до нескольких лет.

Временная составляющая развития (отражающая возникновение, развитие и затухание) очагов короеда-типографа в насаждениях ели основана на анализе следующих данных с метеостанций [5, 10]: температура воздуха, сумма среднесуточных температур воздуха (рис. 2).

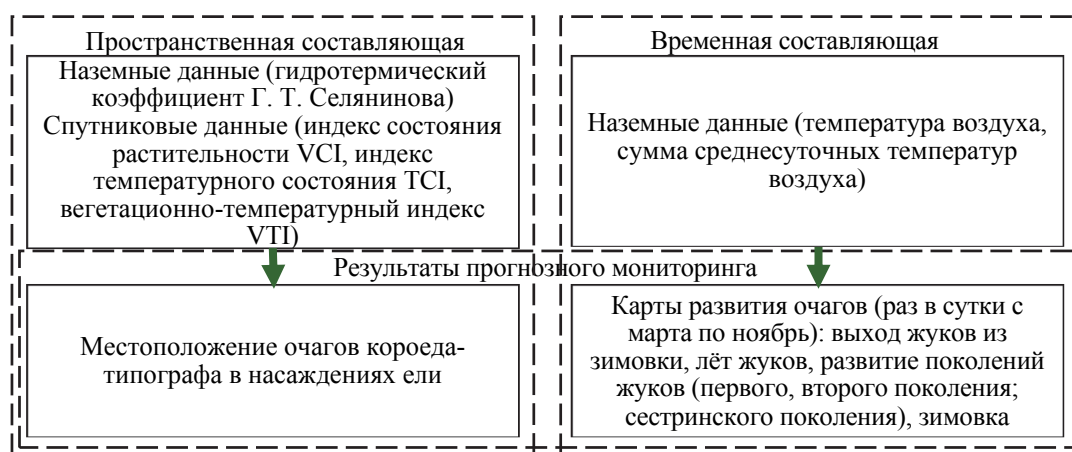


Рис. 1. Методика прогнозного мониторинга развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели

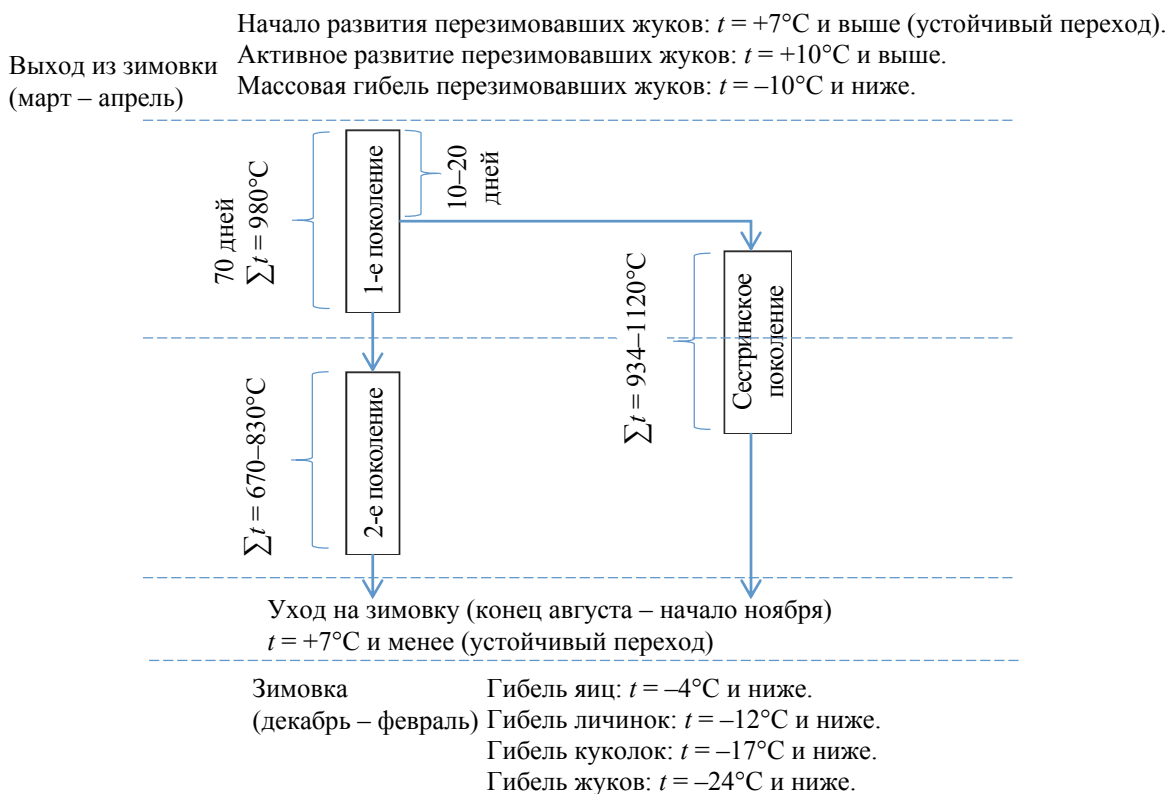


Рис. 2. Расчет временной составляющей развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели: t – температура воздуха; $\sum t$ – сумма среднесуточных температур воздуха

Масштаб прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели – вся страна, пространственное разрешение – 250 м, что обеспечивает необходимую детальность для использования в лесохозяйственной отрасли. Прогнозный мониторинг проводится с марта по ноябрь.

Схема функционирования системы прогнозного мониторинга. Разработанная система прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели содержит (рис. 3):

– *сервис удаленного доступа (предоставление данных пользователям)* – обеспечивает возможность удаленного выбора и просмотра пользователем исходных данных и результатов прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели;

– *подсистему обработки данных* – обеспечивает закачку данных продуктов MOD11 (температура земной поверхности) и MOD13 (вегетационные индексы) со спутников Terra/Aqua MODIS, а также данных с метеостанций, их предварительную обработку и сохранение в базе статистических данных для прогнозного мониторинга. Предварительная обработка данных продуктов MOD11 и MOD13 со спутников Terra/Aqua MODIS включает в себя «обрезку», преобразование в картографическую проекцию СК-95, а также вычисление индексов VCI, TCI и VTI. Предварительная обработка данных с метеостанций включает в себя вычисление гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова [11], а также расчет (путем интерполяции) карт его значений и данных с метеостанций;

– *базу статистических данных для прогнозного мониторинга* – обеспечивает систематизированное хранение данных с метеостанций, данных продуктов MOD11 и MOD13 со спутников Terra/Aqua MODIS, производных продуктов, а также результатов прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели. Вся информация в базе статистических данных представлена в виде растровых или векторных данных. Базовое пространственное разрешение растровых данных составляет 250 м. Растровые данные хранятся в формате GeoTIFF, векторные – в формате Shape. Все данные (как векторные, так и растровые) хранятся в картографической проекции СК-95;

– *подсистему анализа данных* – обеспечивает решение задачи прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели.

Для функционирования системы прогнозного мониторинга выбрана операционная система Ubuntu Server на основе Linux версии для долгосрочной эксплуатации LTS (Long-Term Support, LTS). Система прогнозного мониторинга разработана на базе свободно доступной геоинформационной системы с открытым кодом QGIS (Quantum Geographic Information System, QGIS).

Спутниковые данные. В качестве базовых спутниковых данных используются объединенные в композицию за период от 8 до 16 дней (с целью минимизации влияния облаков и отражения морфологических изменений растительности) свободно доступные продукты MOD11 и MOD13, полученные по данным со спутников Terra/Aqua MODIS с пространственным разрешением 250 и 1000 м соответственно с 2002 г. по настоящее время.

Наземные данные. В качестве наземных данных используются данные с метеостанций, справочные данные по очагам короледа-типографа в насаждениях ели.

Данные с метеостанций являются основой для вычисления на территорию Республики Беларусь и прилегающих стран (для исключения искажения на границах страны) карт значений: гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (периодичность 30 сут), температуры воздуха (периодичность 3 ч).

Справочные данные по очагам короледа-типографа в насаждениях ели являются неотъемлемой составляющей исходной информации, необходимой для калибровки и оценки эффективности прогнозного мониторинга. Сбор справочных данных проводился в 2019 г. путем полевых обследований насаждений ели на территории Минской области Республики Беларусь. Погрешность геопривязки справочных данных не превышала 3 м.

Результаты прогнозного мониторинга. В качестве исходных данных для прогнозного мониторинга местоположения очагов короледа-типографа в насаждениях ели использовалась карта засушливых условий. Она строилась путем усреднения значений гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (периодичность 30 сут) и данных со спутников Terra/Aqua MODIS (индексов VCI, TCI и VTI – периодичность 8 сут) с марта по ноябрь за длительный период – от 1 до 10 лет (с 2010 по 2019 г.).

Результаты показали, что гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова имеет слишком грубое пространственное разрешение и потому не пригоден для прогнозного мониторинга местоположения очагов короледа-типографа в насаждениях ели. Среди полученных по данным со спутников Terra/Aqua MODIS индексов вегетационно-температурный индекс VTI оказался наиболее подходящим для прогнозного мониторинга местоположения очагов короледа-типографа в насаждениях ели. При этом наиболее соответствующим стало усреднение значения индекса VTI с марта по ноябрь за 2017–2019 гг.

Сравнение результатов полевого обследования за 2019 г. (очагов короледа-типографа в насаждениях ели) и усредненных значений индекса VTI с марта по ноябрь за 2017–2019 гг. показало (рис. 4):

– при значительном (относительном) уменьшении усредненных значений индекса VTI в пределах лесных массивов целиком, а также в пределах их весомой части очаги короеда-типографа (результаты полевого обследования) располагаются как по границам, так и в пределах лесных массивов;

– при значительном неоднородном изменении усредненного значения индекса VTI в пределах лесных массивов очаги короеда-типографа располагаются как по границам, так и в пределах лесных массивов;

– при отсутствии значительного уменьшения усредненного значения индекса VTI в пре-

делах лесных массивов очаги короеда-типографа располагаются в основном по границам лесных массивов или недалеко от них.

При прогнозе развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели во времени (выход из зимовки; лёт жуков; формирование 1-го, 2-го и сестринского поколений; уход на зимовку; зимовка) использовались следующие параметры: температура воздуха, сумма среднесуточных температур воздуха. Карты развития очагов короеда-типографа построены на каждый день (с марта по ноябрь) с 2010 по 2020 г. (рис. 5).

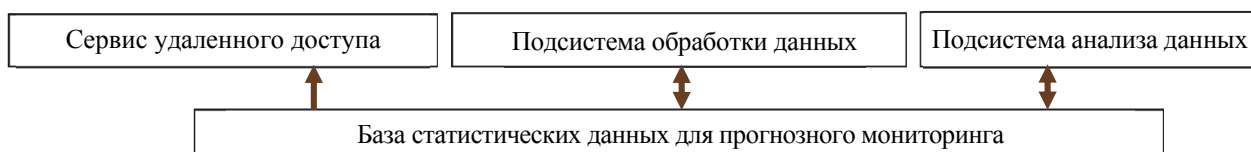


Рис. 3. Общая схема функционирования системы прогнозного мониторинга

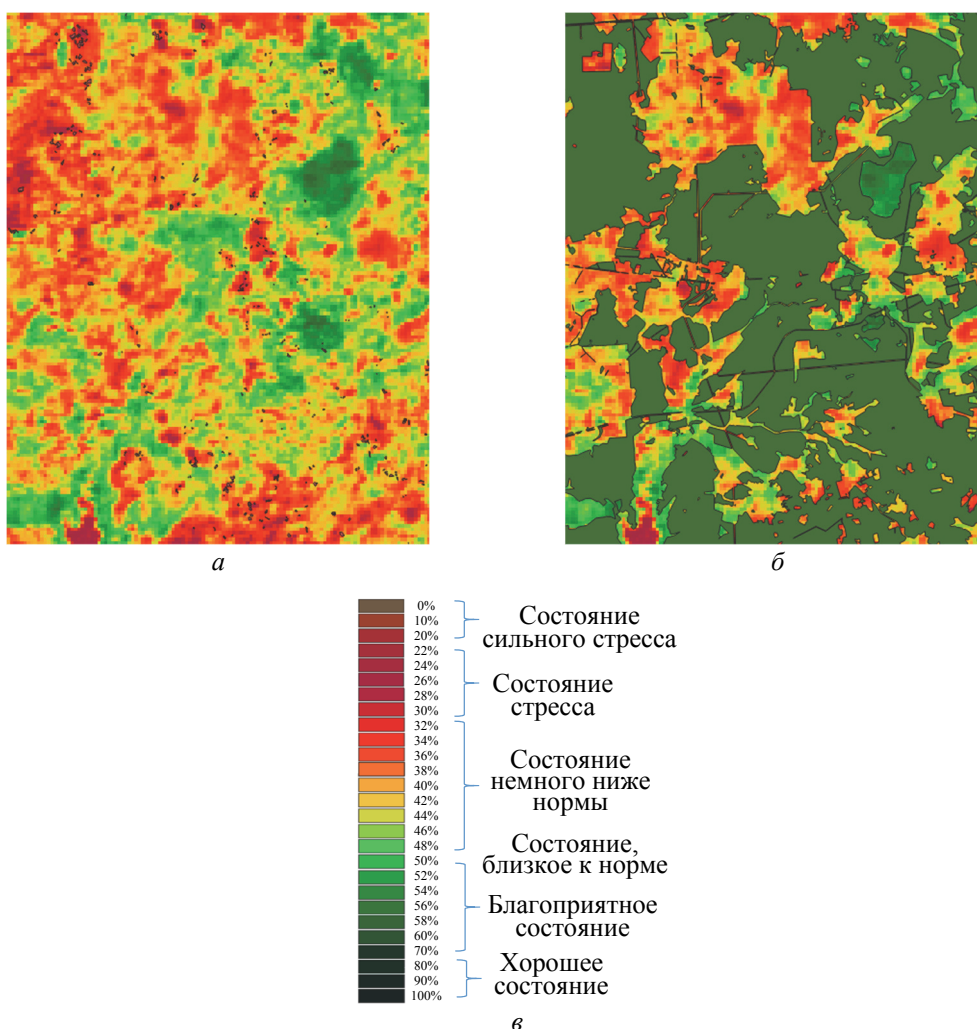


Рис. 4. Сравнение результатов полевого обследования (очагов короеда-типографа в насаждениях ели) и усредненных значений индекса VTI за 2017–2019 гг. (фрагмент государственного лесохозяйственного учреждения «Молодечненский лесхоз»):

а – результаты полевого обследования (контура черного цвета), наложенные на усредненные значения индекса VTI за 2017–2019 гг.; *б* – лесные массивы, наложенные на усредненные значения индекса VTI за 2017–2019 гг.; *в* – легенда значений индекса VTI

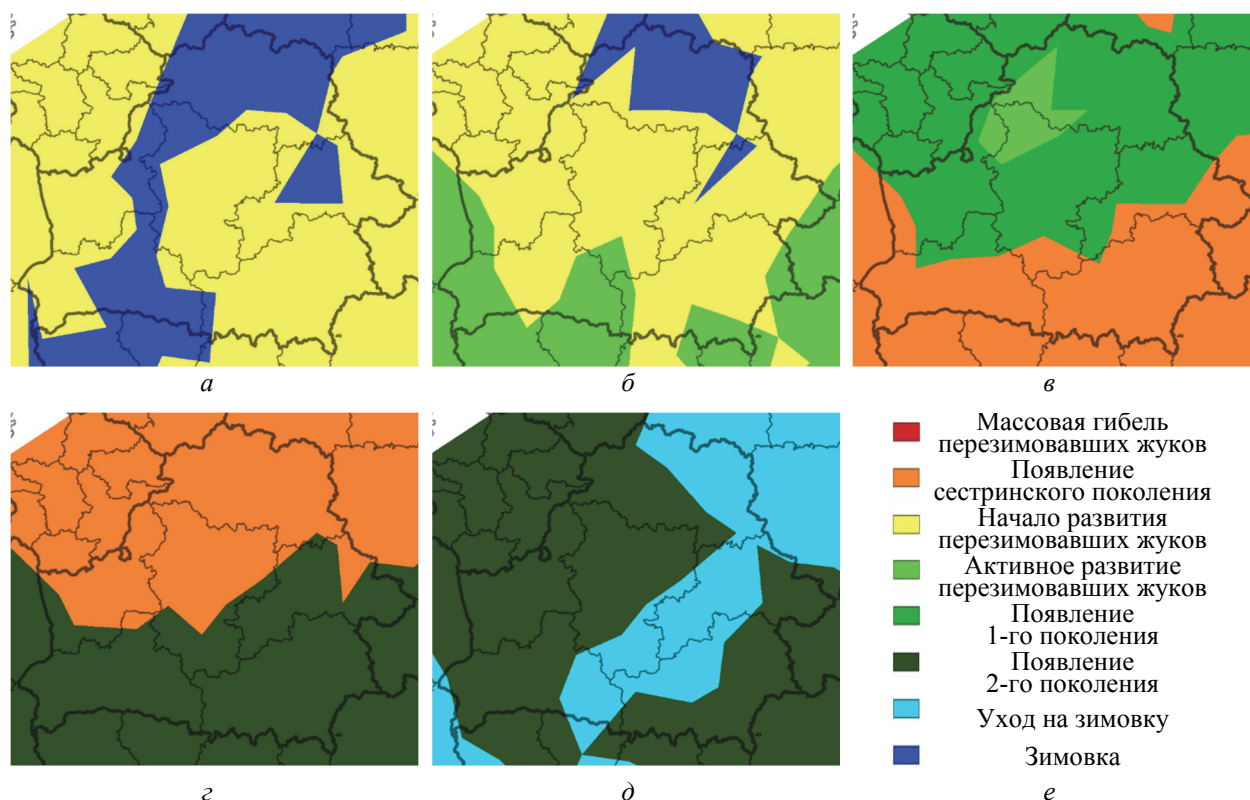


Рис. 5. Прогноз развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели во времени в 2020 г.: а – 12.03.2020; б – 22.03.2020; в – 22.06.2020; г – 22.07.2020; д – 22.09.2020; е – легенда

Заключение. Создание системы прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели является началом реализации нового прогнозного этапа в развитии механизмов реагирования на массовые патологии лесных насаждений в Республике Беларусь. Разработанные и реализованные методики прогнозного мониторинга развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели знаменуют собой переход от качественно-описательного характера (отражаемого в отдельных брошюрах / разделах брошюры)

к количественному (отражаемому как в пространстве, так и во времени на геоинформационной основе). Прогноз развития очагов короледа-типографа в насаждениях ели может быть значительно улучшен за счет учета их лесоводственно-таксационных характеристик (возраст, состав и тип насаждений; подрост; лесорастительные условия; подлесок, живой наземный покров; лесная подстилка; рельеф; виды почв; рубки ухода и т. д.), а также уточненных данных полевого обследования очагов короледа-типографа.

Список литературы

1. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2017 год / под общ. ред. Е. П. Богодяж. Минск: Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2018. 450 с.
2. Мартынов А. Н., Мельников Е. С., Ковязин В. Ф., Аникин А. С., Минаев В. Н., Беляева Н. В. Основы лесного хозяйства и таксация леса: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2008. 372 с.
3. Калинин М. И. Корневедение. М.: Экология, 1991. 173 с.
4. Сарнацкий В. В. Колючие метаморфозы [о влиянии климатических изменений на усыхание хвойных лесов] // Родная прырода. 2013. № 7. С. 34–37.
5. Маслов А. Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов. М.: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.
6. Kogan F. Global drought watch from space. Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. Vol. 78. No. 4. P. 621–636.
7. Ranjan Parida B. Analysing the effect of severity and duration of agricultural drought on crop performance using Terra-MODIS satellite data and meteorological data. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente. Enschede. Netherlands. 2006. 92 p.
8. Singh R. P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. International journal of remote sensing. 2003. Vol. 24. No. 22. P. 4393–4402.

9. Kogan F. Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American meteorological society*. 2001. Vol. 82. No. 9. P. 1949–1964.

10. Павлов И. Н., Миронов А. Г. Куртинное усыхание хвойных насаждений в измененных условиях среды (вопросы диагностики) // Непрерывное экологическое образование и экологические проблемы. 2004. С. 173–186.

11. Ионова Е. В., Лиховидова В. А., Лобунская И. А. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы) // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 18–22.

References

1. Bogodyazh E. P. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus': rezul'taty nablyudeniya, 2017 god* [National environmental monitoring system in the Republic of Belarus: observation results]. Minsk, Respublikanskiy tsentr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okruzhayushchey sredy Publ., 2018. 450 p. (In Russian).

2. Martynov A. N., Melnikov E. S., Kovyazin V. F., Anikin A. S., Minaev V. N., Belyaeva N. V. *Osnovy lesnogo khozyaystva i taksatsiya lesa* [Basics of the forestry and forest inventory]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2008. 372 p. (In Russian).

3. Kalinin M. I. *Kornevedeniye* [Root studies]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 173 p. (In Russian).

4. Sarnatskiy V. V. Thorny metamorphoses [on the impact of climate change on the desiccation of coniferous forests]. *Rodnaya pryroda* [Native nature], 2013, no. 7, pp. 34–37 (In Russian).

5. Maslov A. D. *Koroyed-tipograf i usykhaniye elovykh lesov* [Bark beetle typographer and drying up of spruce forests]. Moscow, VNIILM Publ., 2010. 138 p. (In Russian).

6. Kogan F. Global drought watch from space. *Bulletin of the American meteorological society*. 1997, vol. 78, no. 4, pp. 621–636.

7. Ranjan Parida B. Analysing the effect of severity and duration of agricultural drought on crop performance using Terra-MODIS satellite data and meteorological data. *Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente*. Enschede. Netherlands, 2006. 92 p.

8. Singh R. P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International journal of remote sensing*. 2003, vol. 24, no. 22, pp. 4393–4402.

9. Kogan F. Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American meteorological society*. 2001, vol. 82, no. 9, pp. 1949–1964.

10. Pavlov I. N., Mironov A. G. Curtain drying out of coniferous stands in changed environmental conditions (diagnostic issues). *Nepreryvnoye ekologicheskoye obrazovaniye i ekologicheskiye problemy* [Permanent ecology education and ecology problems], 2004, pp. 173–186 (In Russian).

11. Ionova E. V., Likhovidova V. A., Lobunskaya I. A. Drought and hydrothermal moisture coefficient as one of the criteria for evaluating the degree of its intensity (literature review). *Zernovoye khozyaystvo Rossii* [Grain farming of Russia], 2019, no. 6 (66), pp. 18–22 (In Russian).

Информация об авторах

Кравцов Сергей Леонидович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией аэрокосмического мониторинга. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: Krautsou_sl@rambler.ru

Ильючик Михаил Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель генерального директора по информационным технологиям. Лесостроительное республиканское унитарное предприятие «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27, к. 1, Республика Беларусь). E-mail: michail555@rambler.ru

Голубцов Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории аэрокосмического мониторинга. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: demonix2004@yandex.ru

Козел Антон Леонидович – инженер-программист лаборатории аэрокосмического мониторинга. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: thecubeismagic@gmail.com

Пушкин Андрей Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: aa_pushkin@mail.ru

Савко Илья Леонидович – инженер-программист лаборатории аэрокосмического мониторинга. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: savko.ilya@yandex.ru

Романович Карина Александровна – научный сотрудник лаборатории аэрокосмического мониторинга. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: karisha147@gmail.com

Information about the authors

Krautsou Siarhei Leonidovich – PhD (Engineering), Head of Laboratory of Aerospace Monitoring. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krautsou_sl@rambler.ru

П'ючик Микхail Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Deputy General Director for Information Technology. Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27, k. 1, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: michail555@rambler.ru

Golubtsov Dzmityr Viktorovich – researcher, the Laboratory of Aerospace Monitoring. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: demonix2004@yandex.ru

Kozel Anton Leonidovich – Software Engineer, the Laboratory of Aerospace Monitoring. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: thecubeismagic@gmail.com

Pushkin Andrey Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aa_pushkin@mail.ru

Savko П'ya Leonidovich – Software Engineer, the Laboratory of Aerospace monitoring. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: savko.ilya@yandex.ru

Romanovich Karina Aleksandrovna – researcher, the Laboratory of Aerospace Monitoring. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karisha147@gmail.com

Поступила 15.10.2021