

## **СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ В ПРОГНОЗЕ УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ РАЙОНОВ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Сергей Митрофанович Кононенко*

Сибирский институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Нижегородская, 6, кандидат физико-математических наук, доцент, тел. (383)210-17-15, e-mail: sergej\_k@cn.ru

*Таисия Васильевна Старостина*

Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)222-25-30, e-mail: starostina@sibnigmi.ru

*Владимир Михайлович Топоров*

Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)222-25-30, e-mail: toporov@sibnigmi.ru

Разработаны модели прогноза урожайности яровой пшеницы для всех административных районов Кемеровской области. Используются стандартные приземные агрометеорологические данные и спутниковая информация о вегетационном индексе NDVI. Проверено качество полученных моделей и проведены авторские испытания на независимой выборке. Лучшие модели переданы для производственных испытаний и для практического использования.

**Ключевые слова:** вегетационный индекс, наблюдения, модель прогноза урожайности, пшеница.

## **SATELLITE DATA IN FORECAST FOR WHEAT YIELD FOR AREAS OF THE KEMEROVO REGION**

*Sergey M. Kononenko*

Siberian Institute of Management – a branch of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, 6, Nizhegorodskaya St., Novosibirsk, 630102, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (383)210-17-15, e-mail: sergej\_k@cn.ru

*Taisia V. Starostina*

Siberian Research Hydrometeorological Institute, 30, Soviet St., Novosibirsk, 630099, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)222-25-30, e-mail: starostina@sibnigmi.ru

*Vladimir M. Toporov*

Siberian Research Hydrometeorological Institute, 30, Soviet St., Novosibirsk, 630099, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)222-25-30, e-mail: toporov@sibnigmi.ru

Models of forecasting the yield of spring wheat for all administrative districts of the Kemerovo region have been developed. Standard surface agrometeorological data and satellite information on the vegetative index NDVI are used. The quality of the received models was checked and author's tests were carried out on an independent sample. The best models are transferred for production tests and for practical use.

**Key words:** vegetation index, agrometeorological observations, yield forecast model, spring wheat.

## *Введение*

В работе разработаны модели прогноза урожайности яровой пшеницы для административных районов Кемеровской области. Сложная орография, резко континентальный климат, относительно малые пространственные и временные масштабы погодных явлений в конечном итоге влияют на точность прогностических моделей, использующих только стандартные приземные метеоданные. Дополнительная информация в виде данных дистанционного зондирования атмосферы в статистических моделях прогноза урожайности для регионов Сибири улучшает качество прогнозов [1].

Прогноз, предоставленный администрациям районов в оперативные сроки, принятые в Росгидромете, предварительный (21-23 июня) и уточнённый (21-23 июля) помогает уменьшить экономические потери, связанные с рисками природного характера.

В [2] дается краткий обзор теоретических и прикладных разработок этого направления, проводимых в Институте космических исследований РАН. Методом поиска аналогов временного хода вегетационных индексов разработаны автоматизированные мониторинг и анализ состояния посевов в любом регионе России, оперативная и объективная оценка последствий воздействия на посевы различных факторов. В работе описана технология построения для любого административного района карт отклонений вегетационного индекса от средне-многолетних значений. Графики временной изменчивости значений индекса можно строить в указанных точках земной поверхности. Мониторинг состояния посевов даётся для субъектов РФ.

В [3] вегетационный индекс используется вместе со стандартными данными агрометеорологических наблюдений для построения регрессионных моделей и делается ежедекадный расчет урожайности озимых культур по территории субъектов Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного регионов. По оценке авторов ошибка прогноза не превышала 10%, что даёт возможность использовать данную технологию в оперативном обеспечении сельского хозяйства УГМС Росгидромета.

В работе [4] авторы заменили в своей динамической модели прогноза урожайности рассчитанную относительную площадь листьев посевов на значения измеренного вегетационного индекса NDVI, получив усовершенствованную модель, с помощью которой сделали следующие выводы – величина NDVI достаточно адекватно отражает ход фотосинтеза всех сельскохозяйственных культур; использование NDVI в блоке расчета фотосинтеза в действующей модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы дало положительные результаты; замена теоретической кривой сезонного хода фотосинтеза на измеренные значения вегетационного индекса, привела к повышению оправданности в годы с экстремальными условиями. Полученные результаты дают основание утверждать, что вегетационный индекс NDVI может быть использован как во вновь создаваемых динамических моделях прогнозирования урожайности, так и в действующих моделях для их усовершенствования.

В качестве примера использования вегетационного индекса NDVI в ЕС можно привести материалы регулярного бюллетеня [5], издающегося по проекту Европейской комиссии MARS (Monitoring Agricultural ResourceS), в котором регулярно публикуются точные и своевременные прогнозы ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по территории союза и других стратегических регионов мира. Технология системы AGRI4CAST, оперативно работающая с 1992г., в состоянии контролировать весь вегетационный период таких культур как, зерновые, масляничные, белковые, сахарной свеклы, картофеля, рис, пастбища, способна реагировать на эффекты краткосрочного метеорологического воздействия. Эффективность системы обеспечивают данные дистанционного зондирования и метеорологических наблюдений, агрометеорологическое моделирование и статистический анализ.

### *Описание данных, моделей и терминов*

В данной работе делается оценка влияния различных факторов на точность прогноза. Орография и резко континентальный климат региона значительно влияют на температурный режим и выпадение осадков.

Абсолютный максимум температуры воздуха опускается до минус 45, минус 48° в Горной Шории и до минус 50, минус 57° в предгорьях Кузнецкого Алатау. Средняя годовая амплитуда температуры воздуха (разница между средней температурой самого холодного и самого тёплого месяцев) равна 34 – 38°. Абсолютная амплитуда температура (разница между абсолютным максимумом и абсолютным минимумом температуры) достигает 80 – 85°, а в предгорьях Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау 90 – 95°. Тёплый период (с температурой выше 0°) начинается со второй декады апреля и длится до второй декады октября, в среднем продолжительность его составляет 175 – 195 дней.

Осадки на рассматриваемой территории в связи с большим разнообразием рельефа распределяются крайне неравномерно и колеблются за год в больших пределах: от 400 до 900 мм. В Кузнецкой котловине количество осадков увеличивается по мере приближения к горам Кузнецкого Алатау. На западных его склонах, а также в Горной Шории выпадает наибольшая годовая сумма осадков – до 1000 – 1400 мм, т.е. на западных склонах Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау в местах, наиболее открытых для влажных ветров, осадков выпадает в среднем на 80 – 100% больше, а на восточных подветренных – на 20 – 25 % меньше, чем на равнине.

В годовом ходе осадков наименьшее количество их наблюдается в феврале и марте и не превышает 10 – 20 мм, на отдельных станциях, расположенных на западных и юго-западных склонах Кузнецкого Алатау, количество осадков составляет 33 – 37 мм. В месяц максимума осадков (июль – август) их выпадает 70 – 90 мм, а на отдельных возвышенных местах Кузнецкого Алатау 100 – 150 мм.

В отдельные годы, в зависимости от условий атмосферной циркуляции, как минимум, так и максимум могут быть сдвинуты на другие месяцы, месяч-

ные количества осадков также могут значительно отклоняться от многолетнего среднего значения. Среднее количество осадков за май – сентябрь составляет 250 – 350 мм, на западных склонах Кузнецкого Алатау увеличивается до 350 – 450 мм, а на отдельных станциях – до 600 мм. Наблюдается неравномерность в количестве выпадения осадков. По главному хребту и западным склонам Кузнецкого Алатау атмосферных осадков выпадает за год больше 1000 мм. Это один из самых увлажненных районов Сибири. В южной лесостепи осадков выпадает около 350 мм, а на восточных склонах Кузнецкого Алатау и того меньше. Среднегодовое количество осадков на Кузнецкой котловине составляет 400-450 мм (рис. 1).

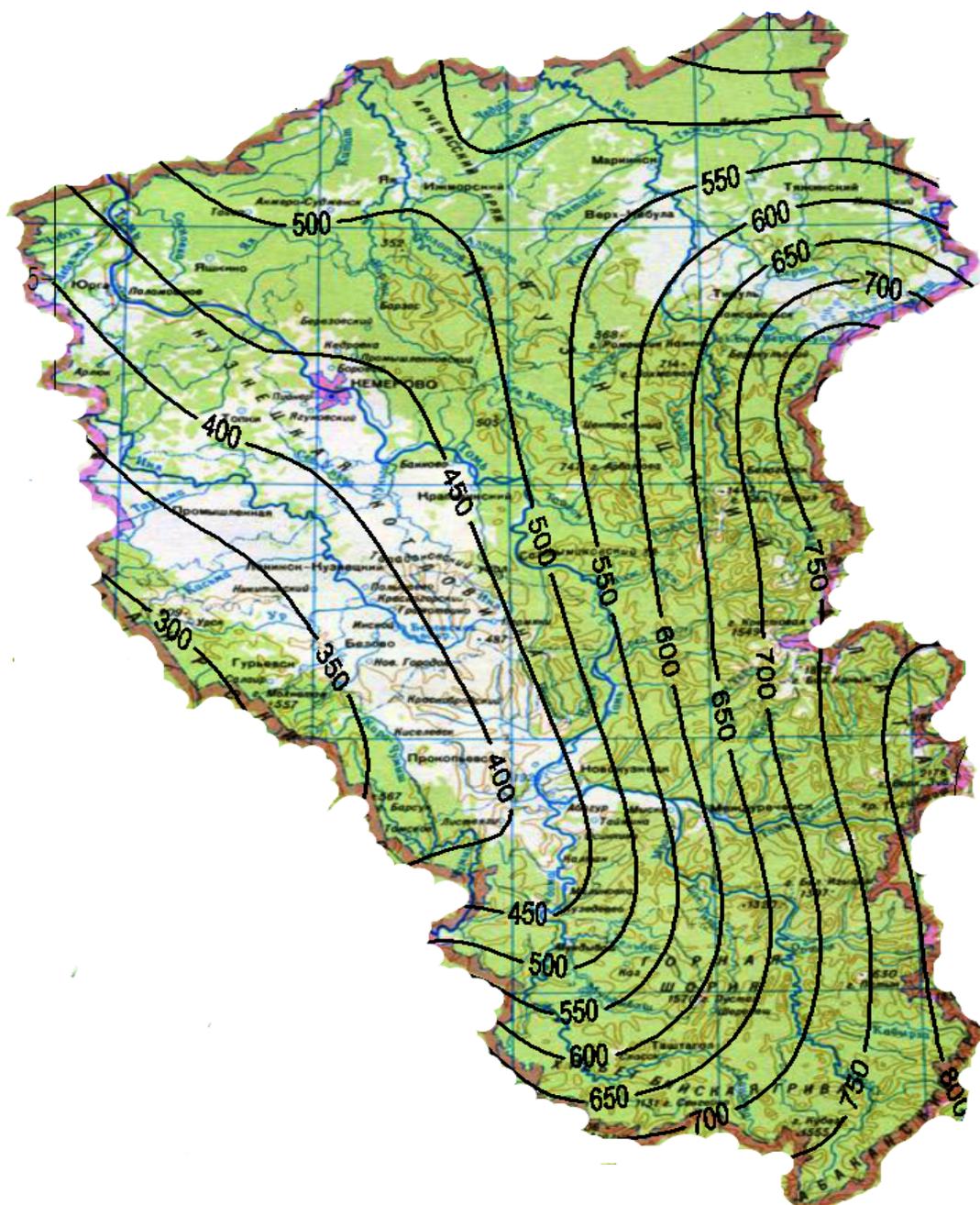


Рис. 1. Среднемноголетние годовые осадки на территории Кемеровской области мм

Появление новых модулей спутникового зондирования поверхности земли с возможностью измерять и обрабатывать различные участки спектра привело к новым показателям вегетационного периода роста растений. К ним относится нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), показатель количества активной биомассы и самый распространенный среди подобных ему индексов. Он используется в различных работах, связанных с дистанционным зондированием поверхности земли и растительного покрова. Накопленная в Институте космических исследований РАН по всей территории России информация по этому индексу с реальной регулярностью 3-4 раза в неделю и разрешением 250 м архивирована с 2000 г., дала начало новому направлению исследований.

Модели включают данные ЗапСибУГМС стандартных наблюдений (осадки, температуру и дефицит насыщения воздуха) и спутниковые данные дистанционного зондирования (вегетационный индекс NDVI). Данные по урожайности взяты из статистических сборников региона.

Данные  $NDVI = (nir - red) / (nir + red)$ , где  $nir$  - отражение в ближней инфракрасной области спектра (диапазон волн 0,7-1,0 мкм),  $red$  - отражение в красной области спектра (диапазон волн 0,6-0,7 мкм) из архива ИКИ РАН. Спектральные каналы выбирались из условия наименьшего отражения растительности в красном диапазоне спектра и, наоборот, самое высокое отражение по сравнению с другими природными объектами в ближнем ИК-диапазоне спектра. Падение спектральной кривой в красном диапазоне и резкий подъем в ближнем ИК-диапазоне характерно для растительности в хорошем состоянии. Фотосинтез высших растений приводит к максимуму отражения листьями в инфракрасной области и к максимальному поглощению хлорофиллом солнечной радиации в красной области спектра. Фазы вегетации яровых зерновых культур влияют на величину вегетационного индекса.

При построении моделей прогноза урожайности фазы вегетации определяют выбор агрометеорологических параметров и интервалов их временного суммирования. Параметры регрессионных моделей находились с помощью метода наименьших квадратов, среда программирования MATLAB. Как и в [6], оценка значимости коэффициента корреляции для парных моделей и в многомерном случае проводилась с помощью критерия Стьюдента, выборочные значения  $t_R^*$  которого, рассчитывались по формулам и сравнивались с  $t_{кр}(\alpha; \nu)$  из таблицы, где уровень значимости  $\alpha$  принимался равным 5%, а число степеней свободы  $\nu = N - m - 1$ , где  $N = 12$  длина выборки,  $m$  число независимых переменных.

При оценке качества полученных моделей проверялось выполнение следующих условий:

- 1) Близость коэффициента детерминации  $r^2$  к значению 0.70, показывающему какой процент дисперсии исходного ряда урожайности  $y = \{y_1, \dots, y_N\}$  описывает модель.

2) По критерию Стьюдента проверялась значимость коэффициентов регрессии. Критическое значение  $t_{кр}(\alpha, \nu)$  определяется по уровню значимости  $\alpha$  (принималось равным 5%) и числу степеней свободы  $\nu = N-2$ , где  $N$  - длина ряда.

3) Адекватность регрессионной модели исходным данным проверялась с помощью критерия Фишера  $F$ .

4) Неравенство  $\sigma_y > \sigma_\varepsilon$ , где  $\sigma_\varepsilon$  - стандартное отклонение ошибок,  $\sigma_y$  - стандартное отклонение исходного ряда. Авторские испытания моделей проводились в соответствии с [7] на двухлетней контрольной выборке. По результатам этих проверок принималось решение о передаче полученных моделей на производственные испытания.

### ***Построение моделей, расчеты, выводы***

При построении моделей для каждого района в качестве независимых параметров подбирались агрометеорологические данные с разными интервалами осреднения, температура (временной интервал I - 20VII, коэффициент корреляции  $r = 0,65$ ) и дефицит насыщения воздуха (временной интервал 21.VI - 20.VII, коэффициент корреляции  $r = 0,75$ ). К ним добавлялись осадки (временной интервал I - 20VII, коэффициент корреляции  $r = 0,78$ ) и данные по вегетационному индексу  $ndvi$ .

Коэффициент детерминации однофакторных моделей (приземные данные в качестве независимых признаков) не превышает 0.57, что указывает на недостаточность числа независимых переменных для описания ряда. При этом статистическую значимость или адекватность этих моделей подтверждает величина критерия Фишера  $F \approx 20$ , что больше  $F_{кр} \approx 5$  и его уровень значимости  $0.01 < 0.05$ .

Двухпараметрические модели, в которых в качестве независимых переменных используются осадки и дефицит

$$y = 0.12x_2 - 0.15x_3 + 9.5$$

улучшают качество модели.

При этом статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ( $10 = F > F_{кр} = 3.7$ ) и его уровень значимости 0.005 значительно меньше задаваемого при расчете коэффициентов модели 0.05. Но коэффициент детерминации модели равен 0.6, что ниже требуемой границы 0.70 и указывает по-прежнему на недостаточность числа независимых переменных.

Замена независимой переменной осадки на  $ndvi$  улучшает показатели модели для данного района и приближает среднюю относительную ошибку оправдавшихся прогнозов к плановым  $\bar{P} = 5-10\%$  (рис. 2).

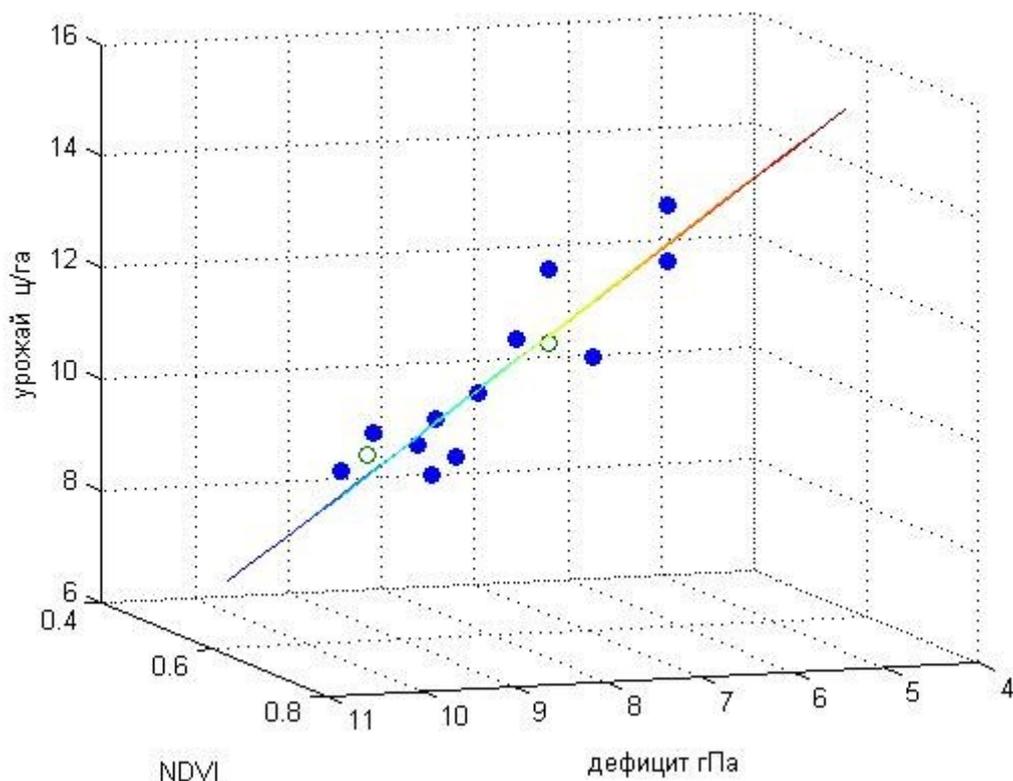


Рис. 2. Двухпараметрическая регрессионная модель (предварительный прогноз 1-5 июня) зависимости урожайности зерновых от значений вегетационного индекса NDVI на 23 неделе от начала года и среднесуточного дефицита водяного пара влажного воздуха за май. Окружности и синие шарики соответственно контрольная и обучающая выборки, за 2002-2015 годы. Тяжинский район Кемеровской области

В моделях с тремя независимыми переменными (температура, осадки, дефицит) как сами агрометеорологические параметры, так и интервалы их осреднения варьировались для разных районов области. Приведем параметры модели трех параметров температуры, дефицита и ndvi

$$y = - 0.57x_2 + 0.2x_3 + 19.4x_4 - 9.5.$$

Коэффициент детерминации 0.85 лучше нормы 0.7. Статистическую значимость построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ( $21.1 = F > F_{кр} = 4.2$ ) и уровень значимости в рассчитываемой статистике Фишера равен 0.0002. Проверка на двухлетней контрольной выборке (2013, 2014 г.) дает следующий результат

$$|y_i^f - y_i^c| = |8.3 - 7.5| = 0.8 < 0.67\sigma = 0.67 * 3.2 = 2.0;$$

$$|y_i^f - y_i^c| = |14.98 - 16.2| = 1.22 < 0.67\sigma = 0.67 * 3.4 = 2.2.$$

Прогноз  $\{y_i^f, x_i\}$  считается оправдавшимся, если его ошибка  $|y_i^f - y_i^c|$  с контрольной выборкой  $\{y_i^c, x_i\}$  меньше  $0,67\sigma$  при заблаговременности не более двух месяцев. Тогда оправдываемость метода  $\gamma$  [7] для двух контрольных годов равна 100 %, а средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов  $\bar{P} = 6.1\%$ .

Включение в модели прогноза урожайности яровой пшеницы спутниковых данных  $ndvi$  улучшает качество моделей и среднюю относительную ошибку на контрольной выборке до плановых 5-10%.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кононенко С. М., Старостина Т. В. Спутниковые данные в прогнозе урожайности пшеницы для административных районов Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 94–101.

2. Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 69–76.

3. Клещенко А. Д., Савицкая О. В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации Труды ГГО. – СПб. : ООО «Д’АРТ», 2014. – Вып. 571. – С. 147–161.

4. Клещенко А. Д., Лебедева В. М., Найдина Т. А., Савицкая О. В. Использование спутниковой информации Modis в оперативной агрометеорологии, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. – Т. 12. – С. 143–154.

5. SPOT Vegetation satellite analysis, MARS Bulletin., 2011, Vol. 19, No. 22 (Web Version).

6. Кононенко С. М., Старостина Т. В. Совместное использование спутниковой и наземной метеорологической информации для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 28–33.

7. РД 52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оператив.) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов // М., Госкомгидромет, 1991. – С. 98–107.

© С. М. Кононенко, Т. В. Старостина, В. М. Гоноров, 2019