

Космический мониторинг условий гнездования саранчовых вредителей в Казахстане с 2000 года

Н. Ю. Цычуева¹, Н. Р. Муратова¹, Д. В. Малахов¹, В. Е. Камбулин², А. Айсарова¹

¹ АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,
Алматы, 050010, Казахстан
E-mail: tsnatally@mail.ru

² Казахский НИИ защиты и карантина растений, Алматы, 050070, Казахстан

В статье рассмотрены два подхода к моделированию условий обитания азиатской саранчи в Казахстане с применением данных дистанционного зондирования. Один из подходов основан на определении изменений классов подстилающей поверхности, определяемых методом неконтролируемой классификации композитных снимков низкого и среднего пространственного разрешения. Второй метод стал логическим продолжением первого и основан на теории экологической модели вида. Моделирование базовой экологической ниши условий гнездования саранчи проведено по абиотическим переменным WorldClim и BioClim для точек регистрации ранних личинок и яйцекладок саранчи при наземных обследованиях. Дальнейшее уточнение полученной модели экологической ниши проводится с учётом динамических переменных конкретного года. К динамическим переменным относятся площадь тростниковых массивов, площадь водоёмов, наличие весенних паводков. Расчёт площадей для динамических переменных проводится по данным дистанционного зондирования среднего разрешения. Совместное применение двух методов позволяет получить своевременные и достоверные результаты мониторинга численности азиатской саранчи. Дальнейшая разработка описываемых методик нацелена на создание прогностической модели возможных вспышек численности саранчи и её применение в целях рационального управления мерами борьбы с вредителем. Использование двух методов в различные годы позволили получить результаты мониторинга за вспышками азиатской саранчи по данным ДЗЗ за период с 2000 по 2017 гг.

Ключевые слова: азиатская саранча, данные дистанционного зондирования, экологическая ниша

Одобрена к печати: 13.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-137-148

Введение

Стадные виды саранчи, имеющие широкие кормовые адаптации, высокий потенциал размножения и способность мигрировать на большие расстояния, являются одним из самых опасных вредителей на планете (Latchininsky, 2011). Следует, однако, отметить, что саранча является важной частью природных экосистем, обеспечивающих устойчивость степей (Стебаев, Сергеев, 1982). Саранча в естественных условиях потребляет лишь малую часть растения, оставляя достаточно растительности для кормления другим животным. Умеренное количество саранчи даже активизирует рост растительности. С другой стороны, саранча представляет собой идеальный пищевой ресурс для самых разных животных — от беспозвоночных до млекопитающих. Можно предположить, что одной из предпосылок, вызывающих вспышки численности саранчи, является значительная трансформация ландшафта человеческой деятельностью (Стебаев, Сергеев, 1982). Такая трансформация, наряду с естественными причинами, может вызвать стадную фазу, характеризующуюся массивным накоплением саранчи и миграцией саранчи на большие расстояния.

Казахстан традиционно известен как территория, в которой часто происходят вспышки роста численности саранчи. В целом 84 года из двух последних столетий (Sergeyev, Latchininsky, 2006) характеризовались как всплеск популяции саранчи на территории бывшего СССР. Один из наиболее массовых видов саранчи — азиатская саранча — *Locusta migratoria* имеет обширные очаги размножения в Центральной Азии, и крупнейшие из них расположены в Казахстане (Мальковский, 1961). Области гнездования *L. migratoria* связаны исключительно с тростниковыми массивами. Постоянные районы размножения *L. migratoria* расположены в тростниковых зарослях Казахстана в нижней части реки Урал, вокруг озёр Камыш-

Самарской системы, вдоль большинства крупных рек (Иргиз, Тургай, Сырдарья, Или, Шу), берегов Балхаша и Алаколя (Камбулин, 2015). Вспышка саранчи в Казахстане 1999 г. поглотила 200 000 гектаров сельскохозяйственных культур, а общий ущерб был оценён в 15 миллионов долларов США (Гаппаров, Лачининский, 2011). Резервациями азиатской саранчи являются, как правило, расположенные среди массивов густых тростников возвышенные участки с лёгкими песчаными и супесчаными почвами, покрытые относительно редким тростником и луговыми травами, преимущественно вейником, пыреем и некоторыми другими злаками. Нередко резервацией стадной азиатской саранчи оказываются сухие русла протоков, днища пересохших небольших озёр и других водоёмов, находящихся среди густых зарослей тростника, а также участки с редким растительным покровом по окраинам тростниковых массивов.

На сегодняшний момент известно большое число научных работ, связанных с биологией саранчовых, исследованиями ареалов их распространения и взаимосвязи численности популяций с различными погодными и ландшафтными компонентами (Камбулин, 2015; Лачининский и др., 2002; Uvarov, 1957). Работ, посвящённых динамическому мониторингу саранчовых, не так много. В конце 1990-х – начале 2000-х гг. в задачи проекта Азиатского банка развития по разработке Казахстанской информационной системы по борьбе с саранчовыми (КИСБИС) входила оценка ключевых экономических и экологических аспектов, включающих необходимость повышения эффективности контроля над распространением саранчовых вредителей, а также сокращения объёмов применяемых пестицидов (Хохлачева, Джудит, 2003). Однако, по окончании проекта, система представляла собой только демонстрационную версию, требующую существенной корректировки в части биомоделей именно казахстанских видов саранчовых.

Работы по разработке методик мониторинга различных видов саранчовых в Казахстане с применением данных дистанционного зондирования (ДДЗ) проводятся силами специалистов АО «НЦКИТ» с начала 2000-х гг. Использование данных дистанционного зондирования для исследований биологических видов, и в частности такого малого по размерам, как саранча, конечно является задачей дешифрирования по косвенным признакам. Космические снимки способны стать источником данных о состоянии земной поверхности, и в частности растительного покрова, который является основной средой обитания для изучаемого вида. По данным ДЗЗ можно определить, насколько благоприятны условия для обитания саранчовых в той или иной местности.

В данной работе представлен обзор основных методов и результатов мониторинга саранчовых вредителей в Казахстане. Перспективным методом является, на наш взгляд, совместное применение статистического анализа (экологическое моделирование условий гнездования) и анализа динамических переменных среды с помощью данных дистанционного зондирования.

Методы и результаты

Исследования, связанные с мониторингом саранчовых в Казахстане с применением средств ДЗЗ, проведённые в АО «НЦКИТ», можно условно разделить на два этапа. На первом этапе, в 2000–2011 гг., были разработаны основные подходы мониторинга и в качестве источника данных использованы снимки низкого разрешения Terra/MODIS. На втором этапе, в 2011–2017 гг., был реализован подход моделирования экологических ниш, а в качестве одного из источников данных выбраны снимки среднего разрешения Landsat. Коротко о методах каждого из подходов будет освещено ниже.

В производственном режиме из-за низкой повторяемости съёмки и высокой вероятности облачного покрова отсутствует возможность применения спутниковых систем высокого пространственного разрешения для мониторинга мест массового размножения саранчовых (Ma, 2005). Спутниковые системы Terra/MODIS с пространственным разрешением от 250 до 1000 м и полосой захвата более 2000 км позволяют получать ежедневные материалы на площадь исследуемого региона. Таким образом, в качестве основного инструмента для космического мониторинга численности саранчовых на территории Казахстана на первом этапе была выбрана эта спутниковая система дистанционного зондирования Земли.

За вегетационный период с мая по сентябрь 2000–2011 гг. были отобраны, по принципу отсутствия облачного покрова, космические снимки для территории Балхашского региона в Алматинской области. На основе данных 2-го ближнего инфракрасного канала были построены мультивременные RGB-композиционные снимки (Red — данные космической съёмки в сентябре, Green — в июле, Blue — в мае) на каждый год исследования. Затем применялся метод построения автоматической классификации полученных композиционных снимков. Процедура проводилась с использованием алгоритма Isodata. Алгоритм позволяет задавать параметры, которые используются для последующего распознавания спектральных образов и реализации метода кластеризации на основе пороговых процедур. При этом первоначальное разбиение на кластеры программа выполняет на основе анализа гистограммы распределения яркости, построенной по синтезированному снимку. В результате выделенные по композиционным снимкам MODIS итоговые кластеры представляют собой классы наиболее крупных ландшафтных единиц данной территории, такие как:

- 1) водные поверхности;
- 2) песчаные поверхности — в этот класс включены барханы, солончаковые пустоши, сухие русла рек и каналов. В весеннее время на этой территории развивается эфемерная растительность, также произрастают редкие кусты тамарикса;
- 3) разреженные тростники — класс включает в себя территории с тростниковой растительностью со средним проективным покрытием, полупустынной растительностью, закреплённые барханы;
- 4) тростники — класс характеризуется сомкнутыми высокими тростниками, рогозой, а также растительностью затопленных территорий,
- 5) тугайные леса и тростники — класс кустарниковой растительности и зарослей тростника, вместе образующие непроходимые заросли;
- 6) эфемерная растительность — растительность, развивающаяся в короткий весенний период.

Верификация результатов проведённой классификации и полевые наблюдения за азиатской саранчой проводились в вегетационный сезон 2009–2011 гг. В этих целях специалистами АО «НЦКИТ» и Института защиты и карантина растений были осуществлены маршрутные выезды на территорию отрождения и питания саранчовых в Балхашском районе Алматинской области. На этой территории осушенная часть побережья и дельты представляет собой наиболее подходящие места для откладки кубышек и развития личинок младших возрастов. При этом личинки старших возрастов и взрослые постепенно перемещаются к бордюрным зарослям тростника, где заканчивают питание. Проверка дешифровочных признаков мест обитания саранчовых по результатам тематической обработки данных ДЗЗ подтвердила основные критерии распознавания этих территорий. Надёжность картирования классов следующая: 92 % — совпадение класса разреженных тростников, 100 % — класс сомкнутых тростников и 94 % — точность определения песчаных поверхностей.

Совпадение точек с обнаруженной саранчой и классом разреженных тростников подтвердило правильность первоначальной гипотезы о влиянии распространения тростниковой растительности на численность саранчи. Так, на 25 % всех обследованных точек обнаружена саранча, из них: на 50 % точек — на разреженных тростниках саранча 3-4-го возраста; на 40 % точек — в тростниках саранча 1–3-го возраста; на 10 % точек на дне старого канала русла была обнаружена саранча 1-го возраста. Для анализа динамики численности саранчовых (официальная статистика территориальной инспекции в агропромышленном комплексе Министерства сельского хозяйства Казахстана по Балхашскому району) в зависимости от распространения тростниковой растительности и увлажнённости территорий проведено совмещение площадных характеристик тростниковой растительности и водных поверхностей в весенний период и песчаных территорий в летний период, когда идёт яйцекладка (рис. 1).

Прямой зависимости между количеством обнаруженной саранчи и динамикой площадей различных классов подстилающей поверхности нет в силу того, что на увеличение численности саранчовых также влияет ряд неучтённых факторов (заселённость кубышками, площадь обработки химикатами предшествующего года). Однако получено подтверждение, что есть зависимость между постепенным увеличением площади песчаных поверхностей

и ростом численности вредителей (например, в 2007 и 2008 гг.). В 2009 г. отмечалось резкое сокращение численности саранчи, одновременно с этим зафиксировано уменьшение песчаных поверхностей. Увеличение площади озёр и подъём грунтовых вод в 2010–2011 гг. вызвало частичное затопление отложенных в 2009 г. кубышек.

Таким образом, получение данных о подстилающей поверхности в оперативном режиме даёт основание для мониторинга благоприятных условий для развития саранчовых вида азиатская перелётная. Также разработаны сценарии возможного развития саранчовых на конкретных ландшафтах с учётом их зависимости от погодных условий текущего и предшествующих годов. Так, при наличии оптимальных для яйцекладки условий предшествующего года и сохранении благоприятных условий для отрождения и питания в текущем году, можно сделать предположение о высокой вероятности появления кулиг саранчи на данной территории. И наоборот, при текущем затоплении территорий с потенциально подходящими для кладки условиями в предшествующем году означает отсутствие массового отрождения на этой территории. Также в анализ закладывается параметр близости к местам, пригодным для питания, даже если отрождение на данной территории не произошло. Это необходимо для учёта жизненного цикла саранчовых, у которых в разном возрасте проявляются различные потребности в количестве пищи и изменении способности перемещаться на большие расстояния. Методика и основные результаты первого этапа были опубликованы в ряде работ (Муратова и др., 2010, 2012).

Второй этап исследований, проводившийся в 2011–2017 гг., характеризуется созданием подхода экологического моделирования с учётом особенностей конкретных видов саранчи на основе абиотических данных (рельеф, осадки, температура воздуха и пр.) и уточнения базовых моделей экологических ниш данными об изменяемых параметрах подстилающей поверхности конкретного года, полученными по оперативным данным ДЗЗ. Описание методик экологического моделирования опубликовано в соответствующих изданиях (Малахов и др., 2017; Цычуева и др., 2016).

В рамках данного исследования авторы придерживаются хатчинсоновского понимания экологической ниши как *n*-мерного куба, на осях которого отложены экологические факторы (Hutchinson, 1957).

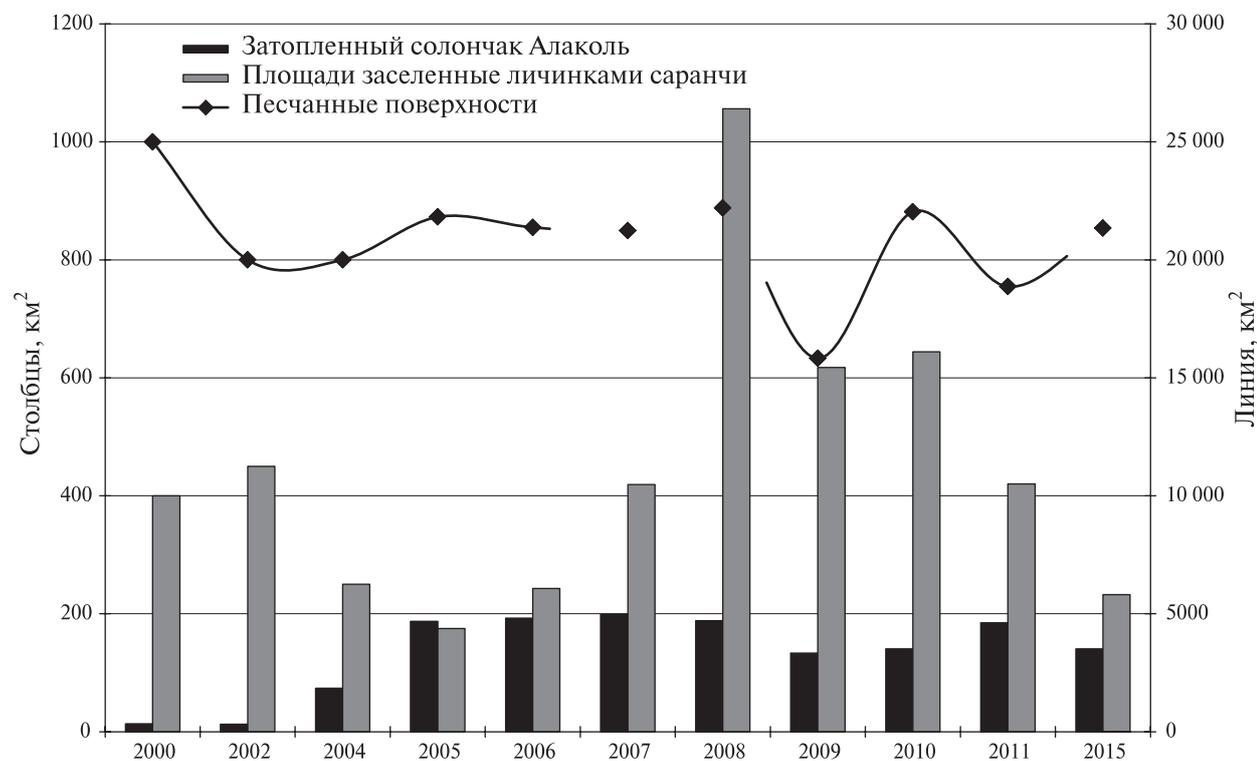


Рис. 1. Изменение площади песчаных поверхностей и водного зеркала солончака Алаколь по ДЗЗ и обнаруженных личинок саранчи по наземным данным (Балхашский район Алматинской области)

По каждому фактору у вида есть диапазон, в котором он может существовать (экологическая валентность). Если провести проекции от крайних точек диапазонов каждой оси факторов, мы получим n -мерную фигуру, где n — количество значимых для вида экологических факторов. Суть моделирования экологической ниши заключается в подборе, тем или иным алгоритмом, совокупности отдельных абиотических параметров (температура, осадки, особенности рельефа и т.д.) и их диапазонов, наилучшим образом описывающих известное распространение вида в природе. Такой подход позволяет, с одной стороны, выявить территории, где вид ещё отсутствует, но его появление весьма вероятно. С другой стороны, изучение значимых абиотических параметров, выявленных в ходе анализа, способно дать указания о мерах регулирования численности опасного вида внутри населённой им территории.

В качестве исходных данных использовались климатические (WorldClim, BioClim, Global-PET) и ландшафтные (ЦМР, с её производными: аспект, экспозиция и т.п.) данные. Для всего диапазона данных по каждому отдельному параметру (среднемесячная температура, сумма осадков и т.д.) проводится вычисление перцентилей (12,5 и 87,5), что позволяет выделить значимый диапазон (75% нормального распределения) с гауссовым распределением. Далее, при помощи контрольных точек (мест встреч яйцекладки и отрождения саранчи), проводится выделение значимых факторов. В данном случае для каждой контрольной точки определяется количество совпадений её географического положения с выявленным диапазоном.

Статистический анализ позволил выявить 42 весомых для гнездования саранчи абиотических параметра (см. таблицу). При анализе весомых параметров выявлено высокое значение температуры и поступающей энергии (параметры Radiation) в холодные месяцы. Следует ожидать, что существует некая оптимальная совокупность условий зимовки кубышек, выход за пределы которой ведёт к их гибели, несмотря на казалось бы очевидные «защитные» факторы в виде почвенного и снежного покрова. Количество осадков в марте и октябре, вероятнее всего, влияет на влажность кубышек и может свидетельствовать либо об оптимальном режиме их увлажнения, необходимом для развития и выживания яиц в кубышке, либо о возможности затопления кладок с их последующей гибелью. Количество осадков в самый сухой сезон регулирует количество зелёной биомассы, являющейся кормовой базой молоди саранчи.

Базовая модель экологической ниши основана на климатических параметрах за последние 50 лет, однако существует ряд параметров, которые являются лимитирующими в конкретные годы и определить эти параметры возможно по данным дистанционного зондирования. Далее будет представлено описание каждого из выделенных динамических параметров, проанализированных с помощью космических снимков. В ходе первого этапа исследований, о которых писалось выше, был применён метод неконтролируемой классификации Isodata, однако в ходе второго этапа нами был использован метод спектральных индексов.

Весенние разливы озёр и рек являются одним из естественных лимитирующих факторов в распространении азиатской саранчи, так как становятся причиной затопления кубышек, отложенных в осенний период. Для цели отделения суши от водных поверхностей использован индекс водных объектов Normalized Difference Water Index (NDWI), вычисляемый на основании данных зелёного и ближнего инфракрасного каналов (McFeeters, 1996). Данный индекс используется для выделения водных объектов и изучения их свойств. Вычисляется по формуле:

$$NDWI = \frac{b2 - b4}{b2 + b4},$$

где $b2$, $b4$ — соответствующие каналы Landsat TM. Водный индекс показывает, что распределение значений для воды всегда выше нуля, в то время как значения на других типах поверхностей — отрицательны.

Тростниковая растительность является одним из основных источников питания для азиатской саранчи. Поэтому определение площадей тростников в пределах изучаемой территории является дополнительной задачей космического мониторинга распространения саранчовых. Расчёт площадей, занятых тростниковой растительностью, подразумевает под собой расчёт вегетационного индекса и сопоставление с данными полевых обследований для

определения диапазонов, в пределах которых значения индекса соответствуют искомому виду растительности. Эффективным методом выделения тростников оказался индекс содержания влаги в зелёной биомассе, основанный на методе, предложенном в работе (Gao, 1995). Применение данного индекса основано на том, что спектр поглощения воды в коротковолновом ИК-диапазоне значительно сильнее, нежели в ближнем ИК-диапазоне. В настоящем проекте использована модификация индекса В. Gao под Landsat 8, имеющая вид:

$$NDWI = \frac{b5 - b6}{b5 + b6},$$

где $b5$ и $b6$ — соответствующие каналы изображения Landsat 8.

Весомые для гнездования азиатской саранчи абиотические параметры

Ключевая абиотическая переменная	Диапазон значений переменной	
Минимальная температура, °С	февраля	–15,2...–13,6
	марта	–6,4...–5,3
	апреля	4,1...4,6
	октября	2,8...3,2
	декабря	–11,4...–10,2
Средняя температура, °С	января	–10,9...–9,6
	февраля	–10,1...–8,7
	марта	–1,9...–0,6
	апреля	9,5...10,1
	июня	21,9...22,2
	ноября	–0,48...0,3
	декабря	–7,2...–6,0
Максимальная температура, °С	января	–6,36...–4,9
	февраля	–5,2...–3,7
	марта	2,9...4,1
	сентября	22,6...23,2
	ноября	3,8...4,8
Количество осадков, мм	в марте	14...19
	в октябре	15...21
Относительная влажность воздуха после полудня, %	(января)	60,96...62,78
	(февраля)	59,9...60,9
	(марта)	57,0...58,8
	(июня)	35,3...36,4
	(октября)	46,3...47,5
	(ноября)	56,45...57,9
	(декабря)	63,3...64,9
Относительная влажность воздуха до полудня, %	(февраля)	91,58...93,84
	(марта)	83,4...85,8
	(апреля)	60,5...61,1
	(ноября)	80,4...81,7
Количество солнечной радиации, Вт/м ²	в марте	118,6...122,3
	апреле	165,3...168,5
	июне	243,7...247,1
Bio12, среднегодовое количество осадков, мм		142,8...192,4
Bio16, осадки наиболее влажного сезона, мм		44,36...65,18
Bio17, осадки наиболее сухого сезона, мм		18,23...28,1
Bio19, осадки наиболее холодного сезона, мм		36,9...45,1
Bio21, наиболее высокая солнечная радиация за неделю, Вт/м ²		242,8...248,4
Bio24, солнечная радиация самого влажного сезона, Вт/м ²		168,9...179,7
Bio26, солнечная радиация самого тёплого сезона, Вт/м ²		234,8...240,9
Индекс засушливости, безразмерный		1540...2094

Индекс NDMI, использующий ближний и коротковолновой ИК-диапазоны, учитывает 6–8 ярусов листвы, что делает его более объективным при расчётах для густых и высоких видов растительности.

На основании разработанной модели получен ряд карт, описывающих оптимальные для гнездования азиатской саранчи условия. Разработанная модель хорошо определяет известные очаги гнездования азиатской саранчи в Евразии и может служить основой для проведения детальных наблюдений на территориях, где сочетаются оптимальные факторы, представляющие потенциальные новые очаги развития вредителя (рис. 2).

Ранее известные границы очагов гнездования азиатской саранчи (Агроэкологический атлас..., 2008) (на рис. 2 выделены чёрной штриховкой) более не пересматривались, а фиксировались без изменения во всех последующих публикациях, посвящённых данной теме. Благоприятные для гнездования азиатской саранчи территории, определённые в ходе моделирования, имеют меньшую площадь по сравнению с ранее опубликованными границами очагов. Сокращение благоприятных для гнездования саранчи территорий связано с уменьшением территорий, занятых тростниками. Также выявлен новый очаг, на территории которого произрастает тростник, и соблюдаются все климатические условия, необходимые для гнездования саранчи. В этой связи необходимы полевые обследования данного участка для подтверждения результатов. Результат данного исследования важен для обновления картографической информации и уточнения границ очагов гнездования.

Для моделирования условий гнездования азиатской саранчи в конкретный год используются значения ключевых переменных базовой модели с добавлением спутниковой информации (сведения о площади зеркала водных объектов и распространении тростниковых растительных ассоциаций на территории гнездования саранчи).

При проведении верификации по данным наземных обследований за 15 лет было выявлено, что 87,5% случаев регистрации гнездовий в Алматинской области попадают в границы смоделированных территорий с условиями от приемлемых до хороших. Анализ распределения наземных точек регистрации гнездования азиатской саранчи показал, что 72% отмеченных точек гнездования расположены внутри тростников или на расстоянии менее одного километра от массивов тростника.

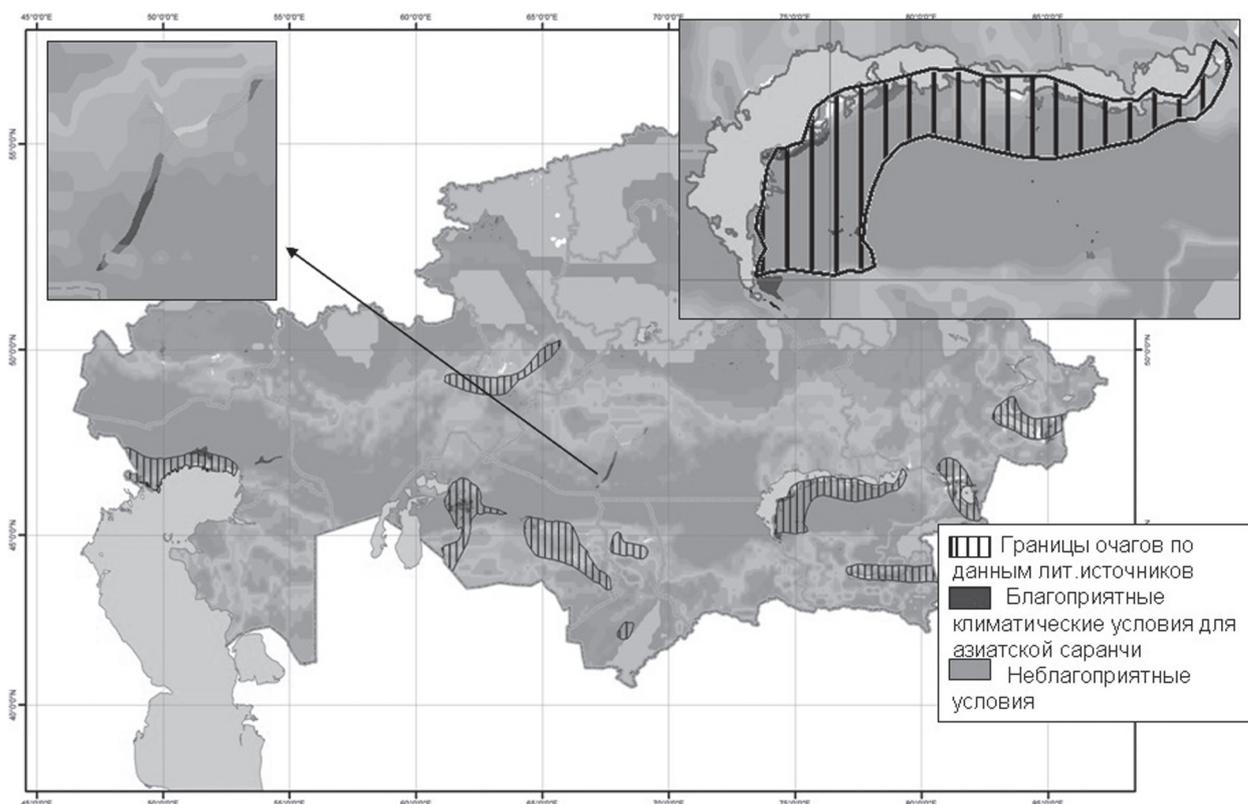


Рис. 2. Уточнённая модель благоприятных условий распространения азиатской саранчи

Дискуссия

Моделирование экологических ниш (ENM) представляет собой быстро развивающуюся область исследований, которая имеет много разных подходов и перспектив (Rushton et al., 2004). В последнее время подход ENM, основанный на ГИС, применялся к очень различным группам живых организмов (Aguilar, Lado, 2012). Исследования, посвящённые ENM различных грибов (Малахов и др., 2017) и видов растений (Babar et al., 2012), насекомых (Ayala et al., 2009), амфибий и рептилий (Groff et al., 2013; Litvinchuk et al., 2014 и т. д.), птиц (Barnagaud et al., 2012; Peterson, Robins, 2003), млекопитающих (Rood et al., 2010). В то же время, работы, посвящённые экологическому моделированию условий гнездования видов саранчи, отсутствуют.

Анализ ключевых переменных полученной модели экологической ниши саранчи подчёркивает уязвимость стадии зимовки. Практически все температурные показатели относятся к холодному времени года, когда вид существует только в состоянии отложенных яиц. Температура воздуха непосредственно связана с температурой почвы, в которой зимуют кубышки. Многочисленные исследования показывают наличие прямой корреляции температуры воздуха и почв. Разумеется, почва, любого типа, обладает известной тепловой инерцией так, что колебания температуры почвы не следуют синхронно колебаниям температуры воздуха. Более того, температура почвы является результатом сложного взаимодействия между влажностью почвы (определяемой, с одной стороны, близостью грунтовых вод, а с другой — количеством осадков), температурой воздуха, теплопроводностью данного типа почв и т. д. Однако верхний слой почвы (5–10 см), в котором перезимовывают кубышки, наиболее отзывчив к колебаниям температуры воздуха. Описание физиологических особенностей зимующих кубышек не входит в рамки данной работы, стоит лишь подчеркнуть, что существует некий температурный оптимум для успешной перезимовки, отклонения от которого в той или иной степени губительны для яиц саранчи, вплоть до полной их гибели. Следовательно, зная среднюю температуру воздуха в холодный сезон текущего года, можно с определённой уверенностью судить, какова будет доля кубышек, переживших холодный сезон, и очертить территории в пределах очага гнездования, на которых выживаемость кубышек наиболее вероятна. Роль осадков в данном случае двойка: осадки тёплого сезона, очевидно, не имеют непосредственного влияния на насекомых, но обеспечивают необходимый для их развития минимум зелёной биомассы. Осадки холодного сезона, выпадающие в виде снега, вероятнее всего имеют отношение к терморегуляции поверхностного слоя почвы, предупреждая, при достаточном количестве снега, промерзание её верхнего слоя и гибель кубышек.

Вспышка саранчи является, главным образом, физиологическим явлением, регулируемым биохимическими и абиотическими переменными окружающей среды (Tronin et al., 2014). Вспышка, возникающая при нехватке продовольствия в очаге гнездования, приводит к превращению одиночной фазы в стадную, а также к массовой миграции стадных взрослых. Модели условий гнездования саранчовых, в идеале, должны стать инструментом прогнозирования вспышек. В рамках данного исследования созданы предпосылки теоретического и научного обоснования для создания прогнозной модели вспышек численности одного из наиболее опасных вредителей сельского хозяйства в Казахстане — азиатской саранчи. Для увеличения своего прогнозирующего значения необходимо добавить несколько переменных в модель. Было отмечено, что, например, вспышки саранчи связаны с циклами солнечной активности (Белецкий, 1993, 2011). Список переменных, необходимых для улучшения текущей модели, включает следующие параметры:

- а) циклы солнечной активности;
- б) предшествующие засушливые события или серии сухих лет.

Сопоставление данных, полученных в результате моделирования условий гнездования, и сведений о физиологических особенностях зимующих яйцекладок подтверждают целесообразность выбранного подхода, так как все опубликованные факты подтверждают или не противоречат результатам настоящего исследования.

Выводы

Точная информация о концентрации кубышек в условиях конкретного года позволила бы точно использовать пестицид или применять новые перспективные методы борьбы с саранчой (Fargues et al., 1997; McNeil, Hurst, 2008). Идеальный метод подавления вспышек — это «профилактический» подход, основанный на эффективном мониторинге мест обитания саранчовых в критические периоды его годового цикла в целях раннего выявления изменений поведения нимф и саранчи. Этот подход обеспечивает адекватное раннее предупреждение и эффективные меры реагирования, направленные на снижение частоты и интенсивности вспышек саранчи на местном уровне и предотвращение их прогресса в крупномасштабной вспышке. «Превентивный» подход должен предполагать долгосрочное и устойчивое управление популяциями саранчи, а профилактика представляет собой комплексную стратегию, которая учитывает все ситуации и все аспекты, включая планы готовности и непредвиденные обстоятельства (Azhbenov et al., 2015).

Сочетание экологической модели с динамическими факторами (определяемыми по ДЗЗ) представляется перспективным и многообещающим методом мониторинга и контроля вспышек численности азиатской саранчи.

Литература

1. Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения / под ред. Афонина А. Н., Грина С. Л., Дзюбенко Н. И., Фролова А. Н. 2008. URL: <http://www.agroatlas.ru/>.
2. Белецкий Е. Н. Теория цикличности динамики популяций // Известия Харьковского энтомологического общества. 1993. № 1. Вып. 1. С. 5–16.
3. Белецкий Е. Н. Массовые размножения насекомых: История, теория, прогнозирование. Харьков: Майдан, 2011. 172 с.
4. Ганпаров Ф. А., Лачининский А. В. Саранчовая проблема в Центральной Азии // Материалы международной научной конф. «Фундаментальные проблемы энтомологии в 21 веке». Санкт-Петербург, 16–20 мая, 2011. 2011. С. 30.
5. Камбулин В. Е. Атлас насекомых и клещей, повреждающих многолетние травы в Казахстане. Астана, 2015. 80 с.
6. Лачининский А. В., Сергеев М. Г., Чильдебаев М. К., Черняховский М. Е., Локвуд Дж., Камбулин В. Е., Ганпаров Ф. А. Саранчовые Казахстана, Средней Азии и сопредельных территорий. Ларамии: Международная ассоциация прикладной акридологии и университет Вайоминга, 2002. 387 с.
7. Малахов Д. В., Цычуева Н. Ю., Витковская И. С. Моделирование экологической ниши септориоза пшеницы с применением данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 113–124.
8. Мальковский М. П. Некоторые вопросы изменения численности саранчовых в Казахстане в связи с организационно-хозяйственными мероприятиями в сельском хозяйстве // Тр. НИИ защиты растений Казахской акад. с.-х. наук. 1961. № 6. С. 47–52.
9. Муратова Н. Р., Цычуева Н. Ю., Камбулин В. Е., Сагинтаев Э. Б. Технологии раннего обнаружения, диагностики и контроля развития болезней и вредителей зерновых культур на основе данных ДЗЗ // Прикладные космические исследования в Казахстане / ред. Т. А. Мусабаев. Сер. «Казахстанские космические исследования». Алматы: Дайк-пресс, 2010. Т. 6. С. 48–56.
10. Муратова Н. Р., Цычуева Н. Ю., Камбулин В. Е. Космический мониторинг мест обитания азиатской саранчи в Казахстане // Космические исследования и технологии. 2012. № 3. С. 20–26.
11. Стебаев И. В., Сергеев М. Г. Внутренняя ландшафтно-популяционная структура ареала, на примере саранчовых // Журн. общей биологии. 1982. Т. 43. № 3. С. 399–410.
12. Хохлачева Г. А., Джудит Т. Казахстанская информационная система по борьбе с саранчовыми (КИСБИС) // Защита и карантин растений в Казахстане. 2003. № 1. С. 15–19.
13. Цычуева Н. Ю., Акназарова Р. Б., Малахов Д. В., Витковская И. С. Мониторинг природных биопасностей с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Математический журн. 2016. Т. 16. № 4 (62). С. 279–290.
14. Aguilar M., Lado C. Ecological niche models reveal the importance of climate variability for the biogeography of protosteloid amoebae // The ISME J. 2012. No. 6. P. 1506–1514.
15. Azhbenov V. K., Baibussenov K. S., Sarbaev A. T., Harizanova V. B. Preventive approach of phytosanitary control of locust pests in Kazakhstan and adjacent areas // Intern. Conf. Agricultural, Ecological and Medical Sciences (AEMS-2015). Penang (Malaysia). 2015. P. 33–37.

16. Ayala D., Costantini C., Ose K., Kamdem G. C., Antonio-Nkondjio C., Agbor J.-P., Awono-Ambene P., Fontenille D., Simard F. Habitat suitability and ecological niche profile of major malaria vectors in Cameroon // *Malaria J.* 2009. No. 8. P. 307.
17. Babar Sh., Amarnath G., Reddy C. S., Anke Jentsch, Sudhakar S. Species distribution models: ecological explanation and prediction of an endemic and endangered plant species (*Pterocarpus santalinus* L.) // *Current Science.* 2012. V. 102. No. 8(25). P. 1157–1165.
18. Barnagaud J.-Y., Devictor V., Jiguet F., Barbet-Massin M., Le Viol I. Relating Habitat and Climatic Niches in Birds // *PLOS ONE.* 2012. No. 7(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032819>
19. Fargues J., Ouedraogo A., Goettel M. S., Lomer C. J. // Effects of Temperature, Humidity and Inoculation Method on Susceptibility of *Schistocerca gregaria* to *Metarhizium favoviride* // *Biocontrol Science and Technology.* 1997. No. 7. P. 345–356.
20. Gao B. Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // *Proc. SPIE* 2480. 1995. P. 225–236.
21. Groff L. A., Marks S. B., Hayes M. P. Using Ecological Niche Models to Direct Rare Amphibian Surveys: A Case Study Using the Oregon Spotted Frog (*Rana pretiosa*) // *Herpetological Conservation and Biology.* 2013. No. 9(2). P. 354–368.
22. Hutchinson G. E. Concluding remarks // *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology.* 1957. V. 22(2). P. 415–427. DOI:10.1101/sqb.1957.022.01.039.
23. Latchininsky A. V. Locusts and us: The 21st century science vs. the Biblical enemy // *Materials of International scientific conf. “Fundamental problems of Entomology in XXI century”* 2011. Saint-Petersburg. 2011. P. 87.
24. Litvinchuk S. N., Schepina N. A., Munkhbaatar M., Munkhbayar Kh., Borkin L. J., Kazakov V. I., Skorinov D. V. Distribution and conservation status of the far eastern tree frog, *Hyla japonica* Günther 1859 in Mongolia and Transbaikalia (Russia) // *Russian Journal of Herpetology.* 2014. V. 21. No. 4. P. 303–314.
25. McFeeters S. K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // *Intern. J. Remote Sensing.* 1996. V. 17. P. 1425–1432.
26. Ma J. Monitoring East Asian migratory locust plagues using remote sensing data and field investigations // *Intern. J. of remote Sensing.* 2005. No. 26(3). P. 629–634.
27. McNeill M. R., Hurst M. R. H. *Yersinia* Sp. (Mh96): A potential biopesticide of migratory locust *Locusta migratoria* L // *New Zealand Plant Protection.* 2008. No. 61. P. 236–242.
28. Peterson A. T., Robins C. R. Using Ecological-Niche Modeling to Predict Barred Owl Invasions with Implications for Spotted Owl Conservation // *Conservation Biology.* 2003. V. 17. No. 4. P. 1161–1165.
29. Rood E., Ganie A. A., Nijman V. Using presence-only modelling to predict Asian elephant habitat use in a tropical forest landscape: implications for conservations // *Diversity and Distributions.* 2010. No. 16. P. 975–984.
30. Rushton S. P., Ormerod S. J., Kerby G. New paradigms for modelling species distributions? // *J. Applied Ecology.* 2004. No. 41. P. 193–200.
31. Sergeev M. G., Latchininsky A. V. Gregarious locusts: the beginning of the coming century // *Entomological Research. North Asia.* 2006. P. 284–286.
32. Tronin A. A., Gorny A. V., Kiselev S. G., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. Forecasting of locust mass breeding by using satellite data // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2014. Т. 11. №4. С. 137–150. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t4/137–150.pdf.
33. Uvarov B. P. The aridity factor in the ecology of locusts and grasshoppers of the Old World // *Arid Zone Research VIII. Human and animal ecology. Reviews of research.* Paris: UNESCO, 1957. P. 164–198.

Space monitoring of the nesting areas of locust species in Kazakhstan since 2000

N. Yu. Tsyshuyeva¹, N. R. Muratova¹, D. V. Malakhov¹, V. E. Kambulin², A. Aisarova¹

¹ “National Center of Space Research and Technologies”, Almaty 050010, Kazakhstan
E-mail: tsnataly@mail.ru

² Kazakh Research Institute of Plant Protection and Quarantine, Almaty 050070, Kazakhstan

Two approaches to the locust nesting conditions modelling using remotely sensed data in Kazakhstan are described and discussed in the paper. The first approach is focused on the estimation of land cover classes dynamics, that is determined with use of unsupervised classification of low to moderate spatial resolution satel-

lite data. The second method is a logic development of the first one and based on the concept of the species' ecological niche. The base model of the locust nesting conditions was developed with abiotic variables taken from BioClim and WorldClim datasets and a series of field registration of egg-clutches and young nymphs of the locust. Further elaboration of the existing ecological niche model implies the inclusion of additional dynamic variables in the analysis, such as: the reeds area for the current year; the water bodies area; and the floods presence or absence in the spring season. Dynamic variables are calculated using actual remotely sensed moderate spatial resolution information. The combination of two methods allows obtaining the reliable information on the abundance of locust. Further development of the described techniques is aimed at creating predictive model for potential locust outbreaks and its application for the rational pest control measures management. The use of two methods in different years allowed obtaining the results of Asian locust outbreaks monitoring according to remote sensed data for the period 2000–2017.

Keywords: Asian locust, remote sensing data, ecological niche

Accepted: 13.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-137-148

References

1. *Agroekologicheskii atlas Rossii i sopredel'nykh stran: ekonomicheski znachimye rasteniya, ikh vrediteli, bolezni i sornye rasteniya* (Agroecological atlas of Russia and neighboring countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds), 2008, URL: <http://www.agroatlas.ru/>.
2. Beletskii E. N., *Massovye razmnozheniya nasekomykh: Istoriya, teoriya, prognozirovanie*, (Mass reproduction of insects. History, theory, forecasting) Khar'kov: Mайдan, 2011. 172 p.
3. Beletskii E. N., *Teoriya tsiklichnosti dinamiki populyatsii* (The theory of population dynamics cyclicality), *Izvestiya Khar'kovskogo entomologicheskogo obshchestva*, 1993, No. 1, Issue 1, pp. 5–16.
4. Gapparov F. A., Lachininskii A. V., *Saranchovaya problema v Tsentral'noi Azii* (Locust problem in Central Asia), *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Fundamental'nye problemy entomologii v 21 veke"* (Proc. Conf. "Fundamental Problems of Entomology in 21st Cent."), 2011, Saint-Petersburg, p. 30.
5. Kambulin V. E., *Atlas nasekomykh i kleshchei, povrezhdayushchikh mnogoletnie travy v Kazakhstane* (Atlas of insects and mites that damage perennial grasses in Kazakhstan), 2015, Astana, 80 p.
6. Lachininskii A. V., Sergeev M. G., Chil'lebaev M. K., Chernyakhovskii M. E., Lovkud Dzh., Kambulin V. E., Gapparov F. A., *Saranchovye Kazakhstana, Srednei Azii i sopredel'nykh territorii* (Locusts of Kazakhstan, Central Asia and adjacent territories), Laramie: Mezhdunarodnaya Assotsiatsiya Prikladnoi Akridologii i Universitet Vaiominga, 2002, 387 p.
7. Malakhov D. V., Tsyhuyeva N. Yu., Vitkovskaya I. S., *Modelirovanie ekologicheskoi nishi septorioza pshenitsy s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Modeling of the ecological niche of wheat septoria using remote sensing data from the Earth), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 113–124.
8. Mal'kovskii M. P., *Nekotorye voprosy izmeneniya chislennosti saranchovykh v Kazakhstane v svyazi s organizatsionno-khozyaistvennymi meropriyatiyami v sel'skom khozyaistve* (Some issues of changes in the number of locusts in Kazakhstan in connection with organizational and economic measures in agriculture), *Trudy NII zashchity rasteniy Kazakhskoi akademii sel'sco-khozyaistvennykh nauk* (Proc. Plant Protection NII in Kazakh Academy of Science), 1961, No. 6, pp. 47–52.
9. Muratova N. R., Tsyhuyeva N. Yu., Kambulin E. V., Sagintaev E. B., *Tekhnologii rannego obnaruzheniya, diagnostiki i kontrolya razvitiya boleznei i vrediteli zernovykh kul'tur na osnove dannykh DZZ* (Technologies for early detection, diagnostics and control of the development of diseases and pests of cereals based on remote sensing data), *"Prikladnye kosmicheskie issledovaniya v Kazakhstane"*, *Seriya "Kazakhstanskije kosmicheskie issledovaniya"*, Vol. 6, Almaty: Daik-press, 2010, pp. 48–56.
10. Muratova N. R., Tsyhuyeva N. Yu., Kambulin V. E., *Kosmicheskii monitoring mest obitaniya aziatskoi saranchi v Kazakhstane* (Space monitoring of habitats of the Asiatic locust in Kazakhstan), *Kosmicheskie issledovaniya i tekhnologii*, Almaty, 2012, No. 3, pp. 20–26.
11. Stebayev I. V., Sergeev M. G., *Vnutrennyaya landshaftno-populyatsionnaya struktura areala, na primere saranchovykh* (Internal landscape-population structure of the area, using the example of locusts), *Zhurnal obshchey biologii*, 1982, Vol. 43, No. 3, pp. 399–410.
12. Khokhlacheva G. A., Dzhudit T., *Kazakhstanskaya informatsionnaya sistema po bor'be s saranchovymi (KISBIS) (Kazakhstan Information System for Combating Locusts)*, *Zashchita i karantin rastenii v Kazakhstane*, Astana, 2003, No. 1, pp. 15–19.
13. Tsyhuyeva N. Yu., Aknazarova R. B., Malkhov D. V., Vitkovskaya I. S., *Monitoring prirodnykh bioopasnostei s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli.* (Monitoring of natural bioassays using remote sensing data from the Earth), *Matematicheskii zhurnal*, 2016, Vol. 16, No. 4 (62), pp. 279–290.

14. Aguilar M., Lado C., Ecological niche models reveal the importance of climate variability for the biogeography of protosteloid amoebae, *The ISME Journal*, 2012, Vol. 6, pp. 1506–1514.
15. Azhbenov V. K., Baibussenov K. S., Sarbaev A. T., Harizanova V. B., Preventive approach of phytosanitary control of locust pests in Kazakhstan and adjacent areas. *International Conference on Agricultural, Ecological and Medical Sciences (AEMS-2015), Penang (Malaysia)*, 2015, pp. 33–37.
16. Ayala D., Costantini C., Ose K., Kamdem G. C., Antonio-Nkondjio C., Agbor J.-P., Awono-Ambene P., Fontenille D., Simard F., Habitat suitability and ecological niche profile of major malaria vectors in Cameroon. *Malaria Journal*, 2009, No. 8, p. 307.
17. Babar Sh., Amarnath G., Reddy C. S., Jentsch A., Sudhakar S., Species distribution models: ecological explanation and prediction of an endemic and endangered plant species (*Pterocarpus santalinus* L.f.), *Current Science*, 2012, Vol. 102, No. 8 (25), pp. 1157–1165.
18. Barnagaud J.-Y., Devictor V., Jiguet F., Barbet-Massin M., Le Viol I., Relating Habitat and Climatic Niches in Birds, *PLOS ONE*, 2012, No. 7(3), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032819>
19. Fargues J., Ouedraogo A., Goettel M. S., Lomer C. J., Effects of Temperature, Humidity and Inoculation Method on Susceptibility of *Schistocerca gregaria* to *Metarhizium favoviride*., *Biocontrol Science and Technology*, 1997, No. 7, pp. 345–356.
20. Gao B., Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space, *Proceedings of SPIE 2480*, 1995, pp. 225–236.
21. Groff L. A., Marks S. B., Hayes M. P., Using Ecological Niche Models to Direct Rare Amphibian Surveys: A Case Study Using the Oregon Spotted Frog (*Rana pretiosa*). *Herpetological Conservation and Biology*, 2013, No. 9(2), pp. 354–368.
22. Hutchinson G. E., Concluding remarks, *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*., 1957, Vol. 22(2), pp. 415–427. DOI:10.1101, sqb.1957.022.01.039.
23. Latchininsky A. V., Locusts and us: The 21st century science vs. the Biblical enemy, Materials of International scientific conference “*Fundamental problems of Entomology in XXI century*”, Saint-Petersburg, 2011, p. 87.
24. Litvinchuk S. N., Schepina N. A., Munkhbaatar M., Munkhbayar Kh., Borkin L. J., Kazakov V. I., Skorinov D. V., Distribution and conservation status of the far eastern tree frog, *Hyla japonica* Günther, 1859 in Mongolia and Transbaikalia (Russia), *Russian Journal of Herpetology*, 2014, Vol. 21, No. 4, pp. 303–314.
25. McFeeters S. K., The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, pp. 1425–1432.
26. Ma J., Monitoring East Asian migratory locust plagues using remote sensing data and field investigations. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, No. 26 (3), pp. 629–634.
27. McNeill M. R., Hurst M. R. H., *Yersinia* Sp. (Mh96) — A Potential Biopesticide Of Migratory Locust *Locusta Migratoria* L., *New Zealand Plant Protection*, 2008, No. 61, pp. 236–242.
28. Peterson A. T., Robins C. R., Using Ecological-Niche Modeling to Predict Barred Owl Invasions with Implications for Spotted Owl Conservation, *Conservation Biology*, 2003, Vol. 17, No. 4, pp. 1161–1165.
29. Rood E., Ganie A. A., Nijman V., Using presence-only modelling to predict Asian elephant habitat use in a tropical forest landscape: implications for conservations, *Diversity and Distributions*, 2010, No. 16, pp. 975–984.
30. Rushton S. P., Ormerod S. J., Kerby G., New paradigms for modelling species distributions? *Journal of Applied Ecology*, 2004, No. 41, pp. 193–200.
31. Sergeyev M. G., Latchininsky A. V., Gregarious locusts: the beginning of the coming century. *Entomological Research. North Asia*, 2006, pp. 284–286.
32. Tronin A. A., Gorny A. V., Kiselev S. G., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Forecasting of locust mass breeding by using satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 137–150.
33. Uvarov B. P., The acidity factor in the ecology of locusts and grasshoppers of the Old World, Arid Zone Research VIII. Human and Animal Ecology, *Reviews of Research*, Paris: UNESCO, 1957, pp. 164–198.