

УДК 551.501, 551.584

В.С. Платонов¹, Г.В. Суркова², П.И. Константинов³**МИКРОКЛИМАТ САТИНСКОГО УЧЕБНО-НАУЧНОГО ПОЛИГОНА МГУ**

В статье приводится обзор результатов исследований микроклимата Сатинского полигона, типичного режима и распределение важнейших метеорологических показателей в зависимости от разнообразного сочетания условий и характеристик рельефа, растительности и других компонентов ландшафта. Рассмотрены основные существующие подходы к исследованию микроклимата, реализуемые на Сатинском полигоне, в том числе и в рамках практики, методы изучения приземного слоя, в том числе автоматизированными измерительными комплексами. Выдвигаются предложения по внедрению и развитию новой современной приборной базы для наблюдений и возможной постановке новых научно-исследовательских задач на основе комплексного подхода. Важнейшим направлением развития исследований является компьютерное моделирование метеорологических процессов микро- и мезомасштаба, учитывающее полную информацию о компонентах ландшафта, получаемую в рамках комплексных наблюдений кафедр факультета на Сатинской УНС. В качестве примеров можно указать наблюдения за процессами тепло- и влагообмена, потоками парниковых газов в различных контрастных местоположениях на полигоне с учетом данных о фитоценозе, почвенном покрове и рельефе различных масштабов. Кроме того, региональное моделирование климата высокого разрешения может стать консолидирующим методом, на базе которого могут быть объединены географические и экологические науки, ставящие своей целью описание и прогноз состояния природной среды и, в частности, климатической системы. Результаты климатического моделирования могут быть использованы для самых разнообразных оценок компонентов ландшафта, во многом определяемых климатическими ресурсами, в том числе и в условиях изменений климата.

Ключевые слова: микроклиматические исследования, классификация микроклиматов, автоматические метеостанции, автоматизированные измерения, моделирование микроклиматов, региональное моделирование климата

Введение. Метеорологические исследования на Сатинской учебно-научной базе в силу пространственно-временных масштабов полигона относятся в первую очередь к решению задач микроклиматологии. Понятие масштаба процессов является одним из важнейших в метеорологии, их классификация строго физически обоснована и базируется на балансных соотношениях и представлении о непрерывности спектра энергии в климатической системе [Вельтищев, Степаненко, 2006]. Принадлежность процессов к тому или иному масштабу определяет специфику законов и уравнений, используемых для их описания, а также методику и необходимое пространственно-временное разрешение для наблюдений за ними. При этом важно понимать, что в данных наблюдений находит свое отражение изменчивость характеристик разноточных масштабов – от локального до синоптического.

К масштабам микроклиматических процессов, согласно общепринятой классификации [Orlanski, 1975], относится диапазон от первых метров до 2 км (с подразделением на микро- α , микро- β и микро- γ диапазоны), что сопоставимо с масштабом основных объектов, формирующих разнообразие микроклиматических различий в пределах Сатинского полигона. Временная изменчивость микромасштаб-

ных процессов варьирует от минут до первых часов.

Под термином «микроклимат» понимается метеорологический режим самого нижнего, прилегающего к земной поверхности слоя воздуха вместе с приповерхностным слоем почвы, где сосредоточена основная масса корневой системы растений. Микроклимат характеризуется большой пространственной неоднородностью метеорологического режима и наличием четкой связи с суточной периодичностью притока солнечной радиации. Микроклимат зависит, с одной стороны, от горизонтальной и вертикальной структуры ландшафта, а с другой – формируется под воздействием общих фоновых факторов климатообразования, характерных для данной широтной зоны [Несмелова, Филиппова, 2006]. Своеобразие свойств подстилающей поверхности, их пространственная изменчивость на указанных масштабах является источником формирования различий в режиме тепло- и влагообмена с приземным слоем атмосферы. При этом неоднородность подстилающей поверхности формируют такие факторы, как различные формы рельефа, водные объекты, растительные сообщества и урбанизированные территории, а также их сочетания.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: vplatonov86@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доц., докт. геогр. н.; *e-mail*: galina.surkova@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, ст. преподаватель, канд. геогр. н.; *e-mail*: kostadini@mail.ru

В рамках общегеографических задач, решаемых на Сатинском полигоне, в том числе и на практике, микроклимат является важнейшим и неотъемлемым компонентом ландшафтной дифференциации полигона, и в большинстве случаев соответствует уровню фации [Общегеографическая практика ..., 2007].

Актуальность микроклиматических исследований не вызывает сомнений, поскольку с приземным слоем атмосферы связана среда обитания человека. Большое значение для целого ряда прикладных задач, в том числе для изучения опасных явлений (заморозки, засушливость, загрязнение воздуха), оценки дискомфорта состояний человека при различных погодных условиях, прогнозирования условий произрастания сельскохозяйственных культур и многих других имеют микроклиматические вариации метеорологического режима.

Проведение микроклиматических наблюдений на территории небольшого полигона и в контрастных условиях среды также имеет значимый аспект, связанный с моделированием процессов в приземном слое. Стремительное развитие вычислительных технологий и представлений о физических процессах в приземном слое воздуха и почве позволяет включать в современные климатические модели детальное описание механизмов обмена теплом, влагой, парниковыми газами, взаимодействия между приземным слоем воздуха и подстилающей поверхностью, почвой, растительными сообществами, урбанизированными территориями. Для их адекватного физического представления требуется целый набор данных о состоянии географической среды с высоким пространственным разрешением, представленных множеством различных параметров, полученных в ходе исследований эмпирическим или полуэмпирическим путем. Именно комплексные наблюдения за метеорологическим режимом приземного слоя и характеристиками окружающей среды, непосредственно оказывающими на него влияние, являются важнейшим источником информации для проверки и верификации разрабатываемых моделей. Таким образом, проводимые измерения стандартных метеорологических элементов, потоков тепла, влаги, импульса в различных растительных сообществах и на разных уровнях с высокой временной дискретностью позволяют внести существенный вклад в понимание физических процессов, управляющих микроклиматом приземного слоя и способствуют повышению качества их воспроизведения моделями.

В связи с необходимостью высокой пространственно-временной детализации микроклиматических наблюдений все большую актуальность приобретает внедрение современных автоматизированных методов измерений большинства метеорологических характеристик, позволяющих улавливать флуктуации масштаба менее 1 часа и исследовать ответственные за них физические процессы, в частности, тонкую структуру турбулентных потоков, их спектр, прохождение мезомасштабных погодных

систем (таких как линии шквалов, грозы, мезомасштабные комплексы и др.). В настоящее время существует большое разнообразие автоматических средств метеорологических измерений, различающихся по классу, области применения, точности. Среди успешно применяемых в рамках Сатинской практики – автоматическая метеорологическая станция (АМС) Davis VantagePro (<https://www.davis.com>), где помимо стандартных измерений температуры и влажности воздуха, скорости ветра и атмосферного давления возможно подключение датчиков солнечной радиации, температуры и влажности почвы, влажности листвы и др. [Константинов, 2014]. АМС более высокого, профессионального уровня активно применяются в экспедиционных исследованиях горных и труднодоступных районов, при экстремальных погодных условиях, например такие как: Campbell Scientific MetPRO Research-Grade Meteorological Station (<https://www.campbellsci.com>), Vaisala AWS310 (<https://www.vaisala.com>) и Aanderaa AWS 2700 (<https://www.aanderaa.com>). В рамках Сатинской практики и экспедиций кафедры широкое применение нашли надежные и компактные датчики температуры (имеются модели и с датчиком влажности) iButton (<https://www.maximintegrated.com/en.html>), а также датчики TinyTags (<https://www.geminidataloggers.com/>) в качестве более точной и надежной альтернативы. Одним из удобных приборов, позволяющих проводить измерения температуры поверхности со сколь угодно малой пространственной детализацией (сантиметры) является пирометр, определяющий поток инфракрасной радиации, излучаемой поверхностью. Температура далее автоматически рассчитывается согласно известному закону Стефана-Больцмана. Расширение этой приборной базы может послужить хорошей материальной основой для проведения комплексных наблюдений за окружающей средой в рамках возможных совместных изысканий с географами других специальностей.

Актуальным направлением комплексных исследований на Сатинском полигоне является оценка различных климатических ресурсов, в частности, биометеорологических индексов, описывающих комфортность погодных и климатических условий для человека и общества в целом.

Известно, что климат и совокупность различных его показателей можно рассматривать как природный ресурс. Непосредственно климатические ресурсы можно определить как «запасы энергии, вещества и информации в климатической системе, ... которые используются или могут быть использованы для решения конкретной задачи в экономике или социальной сфере» [Энциклопедия ..., 2005]. Индексы эффективных температур, холодового стресса, суровости климата, комфортности, продолжительности волн тепла и холода и др. находят широкое применение в энергетике, экологии, медицине, курортологии, рекреации, спорте, обеспечении безопасности работ и т. п. Комплексная оценка ресурсного потенциала может выполняться с

учетом биологической продуктивности, экономического эффекта, их социальной значимости [Суркова, 2017]. Существует много подходов к типизации биоклиматических индексов, например, А.А. Исаев [Исаев, 2001] разделяет их на группы в зависимости от сочетания описываемых ими метеорологических величин, выделяя при этом температурно-влажностные, температурно-ветровые и температурно-влажностно-ветровые типы индексов. Особенности физиологии человека учитываются при расчете комплексного индекса комфортности – физиологически эквивалентной температуры (РЕТ), широко используемой в зарубежной биоклиматологии [Matzarakis et al., 2007].

Метеорологические измерения, проводимые учащимися в рамках летней Сатинской общегеографической практики и в периоды специальных экспедиций, служат основой в том числе и для оценки индексов климатического потенциала, что служит демонстрацией прикладных составляющих метеорологических исследований для студентов.

Главной задачей данной статьи является рассмотрение основных существующих подходов к исследованию микроклимата, реализуемых на Сатинском полигоне, в том числе и в рамках практики (с приведением нескольких примеров). Выдвигаются предложения по внедрению и развитию новой современной приборной базы для наблюдений и возможной постановке новых научно-исследовательских задач на основе комплексного подхода.

В первой части работы рассматривается типизация микроклиматов Сатинского полигона с обоснованием ее методики. Далее приводятся некоторые результаты микроклиматических исследований, проведенных в том числе в зимний период в рамках экспедиций Научного студенческого общества кафедры метеорологии и климатологии МГУ им. М.В. Ломоносова. В заключении сформулированы выводы по полученным результатам и описаны возможные перспективы проведения комплексных исследований.

Материалы и методы исследований. Многолетние полевые исследования сотрудников и студентов кафедры метеорологии и климатологии, а также географического факультета МГУ в рамках общегеографической практики и отдельных экспедиций кафедры легли в основу типизации микроклиматов территории Сатинского полигона. Для летних условий эта работа была выполнена на основе наблюдений за режимом температуры и влажности, для зимних – по характеристикам снежного покрова.

Типизация микроклиматов Сатинского полигона для летних условий. Сатинский полигон характеризуется значительным разнообразием условий рельефа и большой пестротой растительного покрова, что проявляется в заметных различиях метеорологического режима как в воздухе, прилежащем к земной поверхности, так и на самой поверхности и в верхних слоях почвы (открытых участках), а также под пологом леса (от подстилки до вершины крон). Такое разнообразие требует мето-

дического подхода к систематизации различных типов местоположений, характеризующихся схожими микроклиматическими условиями.

Следующие принципы были положены в основу классификации микроклиматов Сатинского полигона для летнего периода, когда их различия проявляются наиболее ярко.

В первую очередь, для проведения типизации выбирается так называемый «опорный» участок, который лучше всего соответствует климатическому фону окружающего ландшафта. Применительно к Сатинскому полигону в этом качестве использовались участки открытого луга или посева зерновых на междуречье (например, Дедюевский холм, Бутовский холм). Далее метеорологические показатели с других участков, используемых для типизации, сравниваются с соответствующими значениями на опорном участке, и вычисляются разности между ними. Полученные разности группируются по грациям, каждой из которых присваивается название (например, «умеренно теплый», «влажный» и др.).

Необходимо отметить, что в результате тщательного анализа базы данных было отобрано 34 дня наблюдений. Выборка по различным местоположениям варьирует в зависимости от частоты наблюдений за указанные дни (в пределах 25–45 случаев) в соответствующих точках.

Данная методика была применена к имеющейся базе данных наблюдений за 1980–2005 гг. за летние сезоны при различных условиях погоды для дней, когда съемка охватывала практически все основные формы рельефа и типы растительности. В качестве основных показателей, характеризующих метеорологический режим каждого участка, брались температура воздуха и парциальное давление водяного пара, как наиболее важные для характеристики свойств приземного слоя атмосферы и описания гидротермических условий местоположения, а также измеряемые с наименьшими погрешностями. Наблюдения проводились в дневное время (с 10 ч до 18 ч) каждые полчаса. Измерялись температура и влажность воздуха на высоте 0,25 и 1,25 м над поверхностью земли, температура поверхности почвы с естественным растительным покрытием, а также на глубине 0,1 м, скорость ветра на высоте 1 м.

Для дальнейшего выделения типов летних микроклиматов на выбранных участках полигона были вычислены средние многолетние отклонения значений температуры и парциального давления водяного пара от «опорных» величин, средних для междуречий. Микроклиматический режим междуречий получил название «теплый» по температурным показателям и «слабо влажный» по содержанию водяного пара. Отклонения температуры и влажности на других участках от соответствующих значений были сгруппированы по грациям, результаты систематизации обсуждаются далее – в разделе, посвященном результатам.

Типизация участков Сатинского полигона по характеристикам снежного покрова. Микрокли-

матические различия сохраняются на Сатинском полигоне и в зимний период. Влияние растительного покрова проявляется, например, в ослаблении радиации при проникновении под полог леса. В отличие от летнего периода, зимой самые холодные участки – пойма и открытые пространства между речий, самые теплые, как и летом, – склоны южной экспозиции. Стоит отметить, что в целом пространственные различия температурного режима разных участков меньше, чем летом.

Важнейшим метеорологическим элементом, формирующим микроклиматические особенности тепло- и влагообмена подстилающей поверхности с атмосферой в зимний период, является снежный покров. Изучение распределения его высоты и плотности в зависимости от типа ландшафта является необходимым для лучшего понимания процессов снегоотложения, метелевого переноса и прочих, формирующих микроклиматические различия.

Данные многочисленных снегомерных съемок на Сатинском полигоне в ходе экспедиций НСО кафедры метеорологии и климатологии были обобщены и использованы в качестве основы карты высоты и плотности снежного покрова. Для взаимного сравнения рассматриваемых участков Сатинского полигона рассчитывалось отношение высоты снежного покрова, плотности и влагозапаса на каждом из них к соответствующим значениям данных показателей на опорных участках «поле», «междуречье». Таким образом, подход с применением полученных коэффициентов позволяет в дальнейшем количественно оценивать характеристики снежного покрова для разных местоположений. Для этого будет достаточно проводить снегомерную съемку только на опорном участке и, используя известные соотношения, рассчитывать высоту, плотность и влагозапас снега для остальных типов.

Теплообмен атмосферой с подстилающей поверхностью в зимних условиях. Одним из ключевых направлений полевых исследований на Сатинском полигоне в зимний период, помимо стандартной микроклиматической съемки, явились измерения и расчеты компонентов теплового баланса – потоков явного скрытого тепла над снегом на открытых и залесенных участках. Расчеты потоков

могут проводиться различными методами – теплового баланса, Мони́на–Обухова и др. [Матвеев, 2000; Монин, Яглом, 1992]. Подобные вычисления требуют наличия данных измерений температуры поверхности и в толще снега, радиационного баланса, температуры и влажности воздуха. Исследование различий в структуре теплового баланса, его суточной изменчивости и зависимости от фоновых погодных условий позволяет лучше описывать процессы теплообмена заснеженной поверхности с атмосферой в мезомасштабных моделях прогноза погоды и, соответственно, стремиться к более адекватному воспроизведению термического режима приземного слоя в зимний период. Проведенные в рамках зимней экспедиции 2009 г. измерения позволили рассчитать потоки явного и скрытого тепла методом теплового баланса. Данные наблюдений за снежным покровом и рассчитанные значения потоков тепла были использованы для тестирования одномерной модели тепловлагопереноса в почве и взаимодействия ее с атмосферой ИВМ РАН [Мачульская, Лыкосов, 2002; Володин с соавт., 2017], являющейся одной из ведущих в мире в своем классе. Численные эксперименты с использованием этой модели выполнялись с учетом начальных и граничных условий, характерных для различных местоположений Сатинского полигона.

Результаты исследований и их обсуждение.

Летний период. Рассмотрим полученную типизацию микроклиматов Сатинского полигона для летних условий. Было выявлено 8 типов метеорологических режимов как по температуре, так и по влажности воздуха с интервалом градаций 1,0°C и 1,0 гПа (табл. 1). Выделенные интервалы обосновывались статистическим анализом базы данных с учетом погрешностей измерений, различий между аналогичными местоположениями, ошибок осреднения и возможных вариаций метеорологических условий. Они дают представление о средней дневной пространственной неоднородности метеорологического режима для различных сочетаний температуры и влажности в сложных условиях рельефа и растительного покрова.

Из табл. 1 следует, что градаций с положительными отклонениями температуры от значений на

Таблица 1

Типы режимов температуры и влажности по средним за день отклонениям для Сатинского полигона, летние условия

Температура воздуха		Влажность воздуха	
Градации отклонений δt , °C	Тип	Градации отклонений δe , гПа	Тип
>+1,0	жаркий	>+3,0	переувлажненный
+0,2...+1,0	очень теплый	+2,1...+3,0	очень влажный
0,0...±0,1	теплый	+1,1...+2,0	влажный
-0,2...-1,0	умеренно теплый	+0,2...+1,0	умеренно влажный
-1,1...-2,0	прохладный	0,0...±0,1	слабо влажный
-2,1...-3,0	умеренно холодный	-0,2...-1,0	умеренно сухой
-3,1...-4,0	холодный	-1,1...-2,0	сухой
>-4,0	очень холодный	>-2,0	очень сухой

междуречье меньше (две градации), чем градаций с отрицательными отклонениями (пять градаций). Это обусловлено разнообразием рельефа и растительного покрова на территории полигона, по-разному «ослабляющих» поступление солнечной радиации к подстилающей поверхности, что приводит к большой дифференциации отрицательных отклонений температуры.

Среди типов режимов влажности большее число градаций получилось для положительных отклонений. Причина в том, что при достаточном количестве осадков воздух в лесах и в отрицательных формах рельефа оказывается более влажным по сравнению с «опорным» участком, что приводит к разным условиям испарения и транспирации и, как следствие, к различному влагосодержанию воздуха.

Итоговые материалы легли в основу классификации летних микроклиматических режимов, наиболее типичных для Сатинского полигона. Генерализация физико-географических условий, сочетание различных градаций, оценка достоверности различий метеорологического режима позволила в итоге выделить 6 основных типов микроклимата рассматриваемой территории (табл. 2).

Полученная классификация была взята за основу при создании карты микроклиматов Сатинского полигона для летних условий (рис. 1). Для проведения границ участков с различным микроклиматическим режимом были использованы топографическая, геоботаническая и геоморфологическая карты мас-

штаба 1:15 000, выполненные на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ и согласованные с кафедрами геоморфологии и палеогеографии, а также биогеографии. Данные, приведенные в табл. 2, обобщены в легенде к карте. Подробное описание каждого из типов микроклимата приведено в работе Несмеловой [1992], *Общегеографической практике ...* [2007].

Зимний период. По данным снегомерных съемок были вычислены соотношения основных характеристик снежного покрова для различных местоположений полигона относительно междуречья (табл. 3). Полученные значения рассматривались как средние, типичные для указанных местоположений в пределах полигона, поскольку относительные величины значительно меньше зависят от конкретных условий снегонакопления в текущем году. Видно, что наибольшая высота снежного покрова (до 40 см) наблюдается для садов, болот, полей, мелколиственных лесов. Средняя высота снежного покрова на полях составляет около 35 см. Минимальные зафиксированные значения характерны для еловых, а также густых смешанных лесов, в составе которых есть хвойные породы. Максимальной измеренной плотности снег достигает в пределах поля; большие значения характерны для поймы р. Протвы, березовых лесов, наименьшие установлены на болотах и в садах.

В рамках экспедиции НСО кафедры метеорологии и климатологии в 2009 г. проводился анализ результатов маршрутных снегомерных съемок с це-

Таблица 2

Типизация микроклиматов Сатинского полигона для летнего периода по средним многолетним данным

Местоположение	Индекс на карте (рис. 1)	Типы			
		По теплу	По влажности		
Междуречья, поля, луга	1а	теплый	слабо влажный		
Пойма, луг	1б	теплый	умеренно влажный		
Склоны южной экспозиции, луг	1в	очень теплый	умеренно сухой		
Склоны северной экспозиции, луг	1г	прохладный	умеренно влажный		
Река, над водой у берега	2	прохладный	влажный		
Заболоченные понижения и расширенные участки днищ балок, большие поляны, молодые вырубки	3	очень теплый	влажный		
Леса смешанные и лиственные – на междуречье и пойме – на склонах: южной экспозиции северной экспозиции	4а } 4б } 4в }	умеренно холодный	влажный		
Леса хвойные – на междуречье сухие влажные	4г			холодный	умеренно влажный
– на склонах южной экспозиции, сухие; южной экспозиции, влажные	4д			умеренно холодный	умеренно влажный
северной экспозиции		нет данных	нет данных		
Лесные балки, днище	5	холодный	очень влажный		
Лесные овраги, тальвег, днище	6	очень холодный	очень влажный		



1а	Теплый, слабо влажный (поля и луга на междуречье)
1б	Теплый, умеренно влажный (поля и луга на пойме)
1в	Очень теплый, умеренно сухой (луга на склоне южной экспозиции)
1г	Прохладный, умеренно влажный (луга на склоне северной экспозиции)
2	Прохладный, влажный (река, урез воды)
3	Очень теплый, влажный (болота, расширенные участки балок, западины, большие поляны, молодые вырубки)
4а, 4б, 4в	Умеренно холодный, влажный (лес смешанный и лиственный: а - междуречье и пойма; б, в - склоны южной и северной экспозиции)
4г, 4д	Умеренно холодный, влажный (лес хвойный: г - междуречье, пойма, д - склоны)
5	Холодный, очень влажный (лесные балки, днище)
6	Очень холодный, очень влажный (лесные овраги, днище)

Рис. 1. Карта микроклиматов Сатинского полигона (Е.И. Несмелова, Г.В. Суркова). Масштаб 1:15 000

Fig. 1. Microclimates map of the Satino field base (E.I. Nesmelova, G.V. Surkova). Scale 1:15 000. Legend to the microclimate map

Таблица 3

Отношение высоты снежного покрова (K_h), плотности ($K_{\text{плот}}$) и влагозапаса ($K_{\text{влаг}}$) для разных местоположений Сатинского полигона к значениям этих показателей для опорного участка «поле, междуречье»

№	Участки	K_h	$K_{\text{плот}}$	$K_{\text{влаг}}$
1	леса еловые	0,73	0,68	0,79
2	склоны залесенные, южной экспозиции, мелколиственные	0,77	0,72	0,98
3	склоны незалесенные южной экспозиции	0,77	–	–
4	пойма Протвы	0,78	0,89	1,03
5	леса смешанные (ель+береза)	0,80	0,79	0,90
6	склоны залесенные северной экспозиции (ель+береза)	0,88	0,80	0,97
7	тальвеги и днища оврагов	0,91	0,79	1,09
8	березовые леса	0,94	0,91	0,85
9	вырубки (мелколиственный молодой лес)	0,96	0,79	1,11
10	пойма Исьмы	0,98	0,84	1,13
11	склоны залесенные северной экспозиции, мелколиственные	0,89	0,85	0,93
12	склоны залесенные южной экспозиции (ель+береза+подлесок)	0,99	0,84	1,16
13	поле, междуречье	1,00	1,00	1,00
14	кустарник	1,02	0,73	0,88
15	склоны залесенные восточной экспозиции (ель+осина)	1,04	–	–
16	склоны незалесенные северной экспозиции	1,04	–	–
17	склоны залесенные западной экспозиции (мелколиственные)	1,06	–	–
18	опушки	1,06	–	–
19	леса смешанные, мелколиственные	1,08	0,72	0,99
20	болота	1,12	0,26	0,60
21	поляны	1,19	–	–
22	сад	1,23	0,47	0,90

люю оценки теплообмена полигона с атмосферой. Была рассчитана повторяемость высот снега в различных ландшафтах полигона, кроме того, на основе классификации местоположений микроклиматов Сатинского полигона была построена карта распределения средних высот и плотностей снежного покрова по ландшафтам полигона, которая может быть использована в учебных и образовательных целях (рис. 2).

Наблюдения и расчеты компонентов теплового баланса, проведенные в рамках экспедиции НСО в 2009 г. на Сатинском полигоне в пределах открытого и залесенного участков, позволили установить, что, согласно методу теплового баланса, лесной полог в несколько раз (от 3 до 8) снижает величины потоков. Влияние синоптических условий для лесной точки прослеживается слабее, чем для открытой; значения потоков увеличиваются в периоды

ясной погоды и выхолаживания. Ход суммы потоков явного и скрытого тепла в основном повторяет динамику радиационного баланса, а расхождения наблюдаются, как правило, в случаях сильной адвекции (около 10°C за сутки) и существенном отрицательном потоке тепла в снег. Поток тепла в снег в основном небольшой, но в отдельные сроки сравним с радиационным балансом (от -40 до 30 Вт/м²). Подобные ситуации были зафиксированы на открытом участке в случаях сильной адвекции тепла и холода, а также иногда при больших значениях баланса.

Последующее сравнение данных наблюдений за снежным покровом и потоками тепла было использовано для верификации расчетов одномерной термодинамической модели ИВМ РАН [Мачульская, Лыкосов, 2002; Володин с соавт., 2017]. Совокупный анализ результатов полевых исследований и мо-

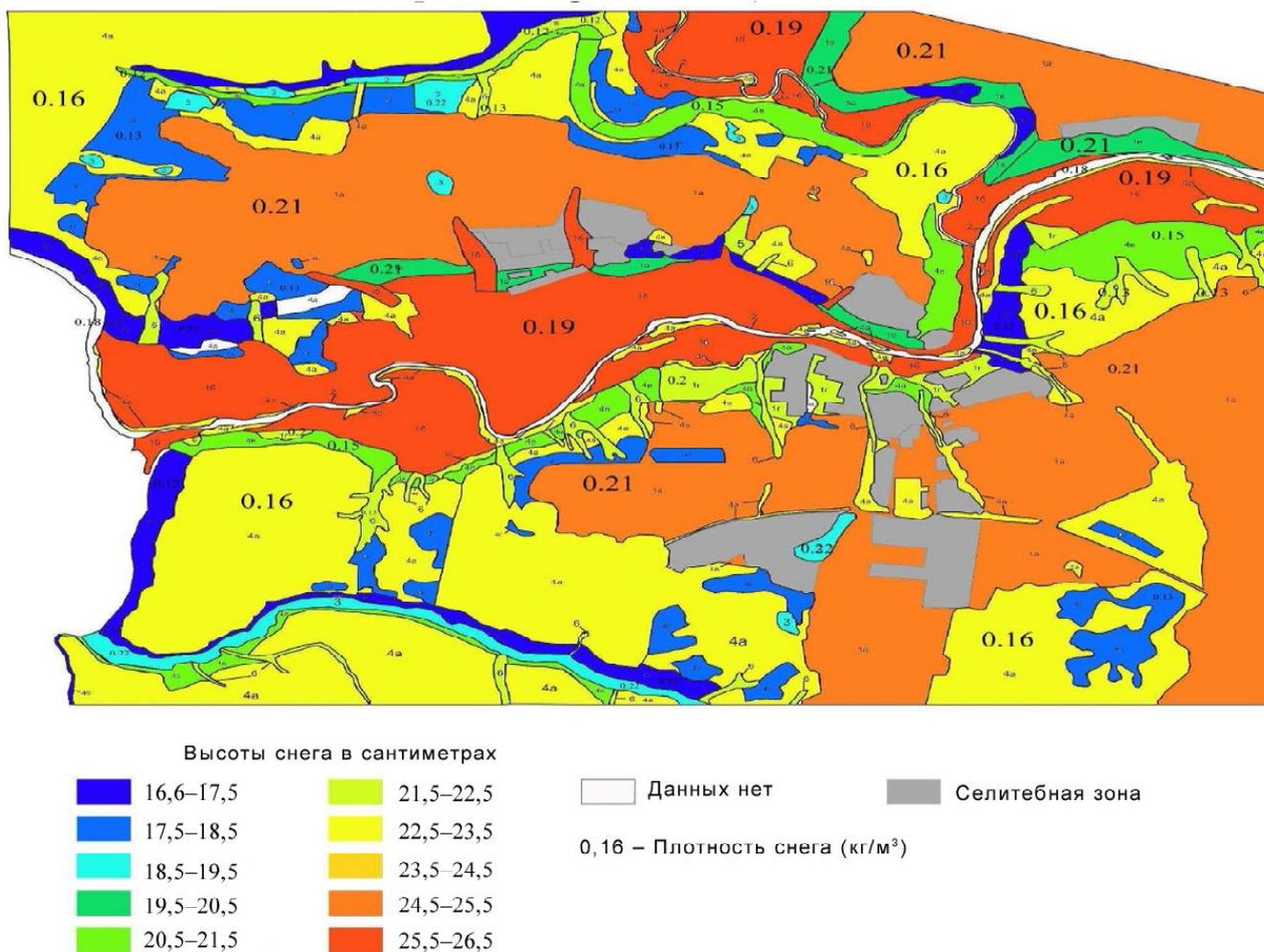


Рис. 2. Распределение средних значений высоты и плотности снежного покрова на полигоне по результатам маршрутных снегомерных съемок 26–31.01.2009 г.

Fig. 2. Distribution of the average values of snow height and density on the field base according to the results of snow-measuring surveys on 26–31.01.2009

делирования показал, что модель хорошо воспроизвела реальные значения физических характеристик снега (высоты и температуры поверхности) и может считаться адекватным инструментом для получения полей компонентов теплового баланса и характеристик подстилающей поверхности (снега) в дальнейших исследованиях. В ходе моделирования турбулентных потоков в масштабах Сатинского полигона было установлено, что модель уловила несоответствия в значениях турбулентных потоков, обусловленные различиями в подстилающей поверхности и типе растительности, причем наибольшее сходство с реальностью достигается в условиях слабой неустойчивости приземного слоя.

Выводы:

– результаты исследований микроклиматических различий на Сатинском полигоне на современном этапе заключаются в сформировавшихся представлениях о типичном режиме температуры и влажности, а также распределения характеристик снежного покрова в зависимости от разнообразного

сочетания условий и характеристик рельефа, растительности и других компонентов ландшафта. Дальнейшие исследования на Сатинском полигоне целесообразно развивать с использованием комплексного подхода к измерениям на основе современных, в том числе автоматизированных измерительных комплексов и привлечения компьютерного моделирования метеорологических процессов микро- и мезомасштаба. Такой подход является актуальным в свете текущего развития приборной и наблюдательной базы, научных представлений о физических закономерностях переноса энергии, биомассы, химических элементов в почве и приземном слое в результате взаимодействия компонентов природной среды, актуальности оценок климатических ресурсов и биоклиматической комфортности среды для человека. Важной областью применения результатов таких работ является моделирование процессов тепло-, влаго- и массообмена, с верификацией по данным полевых наблюдений. В широкой перспективе данный подход применим к использованию

в моделях Земной системы, в том числе для оценок состояния природной среды в других регионах;

– с учетом опыта многолетних исследований на Сатинской УНС в качестве одного из перспективных направлений комплексных исследований следует указать наблюдение за процессами тепло- и влагообмена, потоками парниковых газов в различных контрастных местоположениях на полигоне с учетом полных данных о фитоценозе, почвенном покрове, рельефе. В России существуют единичные примеры реализации подобных комплексных систем наблюдений различной оснащенности и входящих в международные сети мониторинга (Международная совместная программа комплексного мониторинга воздействий загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ) (International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems (ICP IM)), http://www.igce.ru/page/icp_im). На практике полученные результаты могли бы применяться в различных работах – от исследования ландшафтно-геохимических барьеров до особенностей формирования стоков наносов, а также моделирования различных типов экосистем на основе максимально подробной эмпирической информации [Oltchev et al., 1997; Ольчев с соавт., 2008, 2017];

– в качестве перспективного метода получения комплексной информации об окружающей среде в свете развития суперкомпьютерных технологий и физико-математического описания процессов в климатической системе в целом необходимо использо-

вать моделирование климата, в первую очередь на региональном масштабе. Данный подход может стать консолидирующим методом, на базе которого могут быть объединены географические и экологические науки, ставящие своей целью описание и прогноз состояния природной среды и, в частности, климатической системы. Результаты климатического моделирования могут быть использованы для самых разнообразных оценок компонентов ландшафта, во многом определяемых климатическими ресурсами. Актуальность такого подхода подкрепляется тем, что происходящие и прогнозируемые изменения климата очевидно ведут к значительным откликам и в других компонентах географической оболочки, и требуют всесторонней оценки [Кислов А.В. с соавт., 2019];

– кафедра метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова имеет успешный опыт применения регионального моделирования климата высокого разрешения (с горизонтальным шагом в первые км) на длительные периоды времени (первые десятилетия) при помощи региональной негидростатической модели COSMO-CLM [Варенцов с соавт., 2017; Platonov et al., 2017a,b]. Использование данной технологии является перспективным, например, для воспроизведения мезоклиматических особенностей климата Калужской области, а также валидации модели на данных комплексных наблюдений, проводимых на Сатинской УНС.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № АААА-А16-116032810086-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2017. № 6. С. 25–37.
- Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М., 2006. 101 с.
- Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 164–178.
- Исаев А.А. Экологическая климатология. М., Научный мир, 2001. 458 с.
- Кислов А.В., Торопов П.А., Платонов В.С., Ольчев А.В., Варенцов М.И. Региональное моделирование климата для географического анализа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2019. № 5. С. 3–12.
- Константинов П.И. Инновационная практика по метеорологии и климатологии. М.: 2014. 71 с.
- Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 752 с.
- Мачульская Е.Е., Лыкосов В.Н. Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров // Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 20–33.
- Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. В 2-х т. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 695 с.
- Несмелова Е.И., Филиппова М.Г. Микроклиматология: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 186 с.
- Несмелова Е.И. Микроклимат Сатинского полигона. М.: Изд-во МГУ, 1992. 74 с.
- Общегеографическая практика в Подмосковье / Под ред. Г.И. Рычагова. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 360 с.
- Ольчев А.В., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. Модельный подход для описания переноса CO₂ между лесными экосистемами и атмосферой // Лесоведение. 2008. № 3. С. 3–13.
- Ольчев А.В., Мухартова Ю.В., Левашиова Н.Т., Волкова Е.М., Рыжова М.С., Манура П.А. Влияние пространственной неоднородности растительного покрова и рельефа на вертикальные потоки CO₂ в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 612–623.
- Суркова Г.В. Климатические ресурсы и их прогнозируемые изменения в XXI веке в России. Диссертация на соискание уч. степени докт. геогр. наук. М., 2017. 287 с.
- Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова / Под ред. Н.В. Кобышевой, К. Ш. Хайруллина. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. 319 с.
- Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Application of the RayMan model // International Journal of Biometeorology. 2007. Vol. 51. P. 323–334.
- Oltchev A., Constantin J., Gravenhorst G., Ibrom A. A six-layer SVAT model for a simulation of water vapour and sensible heat fluxes in a spruce forest // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 1997. Vol. 45. P. 5–37.

Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1975. Vol. 56. S. 5. P. 527–530.

Platonov V., Kislov A., Rivin G., Varentsov M., Rozinkina I., Nikitin M., Chumakov M. Mesoscale atmospheric modelling technology as a tool for creating a long-term meteorological dataset // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2017(a). Vol. 96. DOI: 10.13140/RG.2.2.12263.24484

Platonov V.S., Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Samsonov T.Ye., Chubarova N.Ye., Zhdanova E.Yu. Technology of creating a long-term data archive of meteorological and radiation fields with high spatial and temporal resolution for the Moscow region // *Report series in aerosol science, Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting.* Helsinki. 2017(b). Vol. 201. P. 391–394.

Поступила в редакцию 06.04.2018

После доработки 01.09.2018

Принята к публикации 28.06.2019

V.S. Platonov¹, G.V. Surkova², P.I. Konstantinov³

MICROCLIMATE OF THE SATINO TEACHING AND RESEARCH FIELD STATION MSU

The article provides an overview of the results of studying the microclimate of the Satino research station, typical behavior and distribution of the most important meteorological variables depending on the diverse combinations of conditions and characteristics of relief, vegetation and other landscape components. There are considered the principal existing approaches of microclimate investigation, implemented at the Satino research station, in particular, for the students' field training, as well as methods of surface layer study, including the application of automatic measurement complexes. It is proposed to introduce and develop a novel modern instrumental base and new research activities based on an integrated approach. Computer modeling of micro- and mesoscale meteorological processes is the most important area of research development, because it allows considering the complete information about landscape components obtained as a result of complex observations of faculty's departments at the Satino research station. The examples include observations on the heat and moisture exchange processes and the greenhouse gas fluxes within several contrasting locations, taking into account data about phytocenosis, soil type and relief on different scales. In addition, high-resolution regional climate modeling could be a consolidating method of the geographical and environmental sciences aimed to understand and predict environment state and, in particular, the climate system. The results of climate modeling could be used for a wide variety of landscape components assessment, largely determined by climatic resources, in particular, under the climate change.

Key words: microclimatic studies, classification of microclimates, automatic meteorological stations, automatic measurements, microclimate modeling, regional climate modeling

Acknowledgements. The study was carried out under the state scientific task № AAAA-A16-116032810086-4.

REFERENCES

Enciklopediya klimaticheskikh resursov Rossiyskoy Federacii [Encyclopedia of Climate Resources of Russian Federation] / Feder. sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy, Gl. Geofiz. observatoriya im. A.I. Voeykova; ed. by N.V. Kobysheva, K.Sh. Khayrullin. SPb.: Gidrometeoizdat, 2005. 319 p. (in Russian)

Isaev A.A. Ekologicheskaya klimatologiya [Ecological climatology] M.: Nauchnyi mir, 2001. 458 p. (in Russian)

Konstantinov P.I. Innovacionnaya praktika po meteorologii i klimatologii [Innovation training in meteorology and climatology]. M., 2014. 71 p. (in Russian)

Machulskaya E.E., Lykossov V.N. Modelirovanie termodinamicheskoi reakcii vechnoi merzloty na sezonnye i mezhgodovye variacii atmosferykh parametrov [Modelling of the permafrost thermodynamic response to the seasonal and interannual

variations of atmospheric parameters] // *Fizika atmosfery i okeana.* 2002. Vol. 38. № 1. P. 20–33. (in Russian)

Matveev L.T. Fizika atmosfery [Physics of the atmosphere]. SPb.: Gidrometeoizdat, 2000. 752 p. (in Russian)

Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Application of the RayMan model // *International Journal of Biometeorology.* 2007. Vol. 51. P. 323–334.

Monin A.S., Yaglom A.M. Statisticheskaya gidromekhanika [Statistical hydromechanics] (2 Volumes). SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 695 p. (in Russian)

Nesmelova E.I. Mikroklimat Satinskogo poligona [Microclimate of the Satino field base]. M.: Izdatelstvo MGU, 1992. 74 p. (in Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* vplatonov86@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* galina.surkova@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Senior Assistant, PhD. in Geography; *e-mail:* kostadini@mail.ru

Nesmelova E.I., Filippova M.G. Mikroklimatologia. Uchebnoe posobie [Microclimatology. Tutorial]. M.: Geograficheskiy fakultet MGU, 2006. 186 p. (in Russian)

Obshchegeograficheskaya praktika v Podmoskovie [General geographical practice in the Moscow region] / Ed. by G.I. Rychagov. M.: Geogr. fakultet MGU, 2007. 360 p. (in Russian)

Oltchev A., Constantin J., Gravenhorst G., Ibrom A. A six-layer SVAT model for a simulation of water vapour and sensible heat fluxes in a spruce forest // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 1997. Vol. 45. P. 5–37.

Oltchev A.V., Kurbatova Yu.A., Varlagin A.V., Vygodskaya N.N. Modelnyi podkhod dlya opisaniya perenosa CO₂ mezhdru lesnymi ekosistemami i atmosferoi [Model approach to the description of CO₂ transfer between forest ecosystems and the atmosphere] // *Lesovedenie*. 2008. № 3. P. 3–13. (in Russian)

Oltchev A.V., Mukhartova Yu.V., Levashova N.T., Volkova E.M., Ryzhova M.S., Mangura P.A. Vliyaniye prostranstvennoi neodnorodnosti rastitel'nogo pokrova i reliefa na vertikalniye potoki CO₂ v prizemnom sloe atmosfery [Influence of the spatial heterogeneity of vegetation and relief on the vertical CO₂ fluxes at the atmospheric boundary layer] // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2017. Vol. 53. № 5. P. 612–623. (in Russian)

Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1975. Vol. 56. S. 5. P. 527–530.

Platonov V.S., Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Samsonov T.Ye., Chubarova N.Ye., Zhdanova E.Yu. Technology of creating a long-term data archive of meteorological and radiation

fields with high spatial and temporal resolution for the Moscow region // Report series in aerosol science. Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting. Helsinki, 2017(b). Vol. 201. P. 391–394.

Platonov V., Kislov A., Rivin G., Varentsov M., Rozinkina I., Nikitin M., Chumakov M. Mesoscale atmospheric modelling technology as a tool for creating a long-term meteorological dataset // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017(a). Vol. 96. DOI: 10.13140/RG.2.2.12263.24484

Surkova G.V. Klimaticheskie resursy i ih prognoziруemye izmeneniya v XXI veke v Rossii [Climate resources and their projected changes in the 21st century in Russia]. Dissertation for the degree of Doctor of Science. 2017. 287 p. (in Russian)

Varentsov M.I., Samsonov T.Ye., Kislov A.V., Konstantinov P.I. Vosproizvedeniye ostrova tepla Moskovskoy aglomeratsii v ramkah regional'noy klimaticheskoy modeli COSMO-CLM [Simulation of the urban heat island of Moscow agglomeration within the COSMO-CLM regional climate model] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* 2017. № 6. P. 25–37. (in Russian)

Veltishchev N.F., Stepanenko V.M. Mesometeorologicheskie processy [Mesoscale atmospheric processes]. M., 2006. 101 p. (in Russian)

Volodin Ye.M., Mortikov Ye.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Yakovlev N.G. Vosproizvedeniye sovremennogo klimata v novej versii modeli klimaticheskoy sistemy IVM RAN [Simulation of the modern climate by a new version of INM RAS climate system model] // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2017. Vol. 53. № 2. P. 164–178. (in Russian)

Received 06.04.2018

Revised 01.09.2018

Accepted 28.06.2019