

УДК 502.2/519.8(075.8)

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ SWAT-МОДЕЛИ НА ТЕРРИТОРИЮ КРЫМА

*Глущенко И. В.*

*Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, Украина, Симферополь  
E-mail: ir256@rambler.ru*

В статье дана оценка репрезентативности данных, необходимых для запуска SWAT-модели, показаны пути заполнения разрывов между доступными данными и данными необходимыми для построения SWAT-модели на территорию Крыма

**Ключевые слова:** SWAT, геоинформационное моделирование, интерполяция, климатические данные

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) – одна из самых широко используемых в мире моделей, которая стала своего рода стандартом для оценки и прогнозирования влияния как природных, так и антропогенных факторов на состояние водных ресурсов в пределах достаточно больших (более 100 кв. км) водных бассейнов и бассейновых структур. Она позволяет оценить качество и количество водных ресурсов, донных отложений, почвенную эрозию, миграцию питательных веществ и гербицидов, урожайность сельскохозяйственных культур. Ее ценность заключается в том, что с ее помощью моделируются процессы, которые могут происходить при изменении климата, строятся сценарии изменения интересующих показателей в зависимости от принимаемых управленческих решений [1, 2]. Но точность любой модели во многом зависит от качества входных данных. Для запуска SWAT модели требуется наличие следующих данных: рельеф земной поверхности, почвы, типы использования территории, метеорологические и климатические параметры. Оценка недостатков и репрезентативности этих данных, а также нахождение путей заполнения разрывов между доступными данными и данными необходимыми для построения SWAT-модели на территорию Крыма и является основной целью данного исследования.

**Рельеф.** Цифровая модель рельефа (ЦМР) может быть построена как по оцифрованным горизонталям топографических карт, так и по находящимся в открытом доступе данным радарной топографической съемки (SRTM). Нами для построения ЦМР на территорию Крыма использовались данные SRTM4 с пространственным разрешением 3 угловые секунды (90 метров). По некоторым оценкам [3], их точность соответствует карте масштаба 1:50000 для равнинных и 1:100000 для горных районов, что вполне достаточно для использования в SWAT модели на территорию Крыма.

**Типы землепользования.** Источниками построения карт типов землепользования могут быть космические снимки, векторные и растровые топографические карты, схемы земле- и лесоустройства. Мы использовали следующие источники – космический снимок Landsat 7 ETM+, векторная карта

Крыма масштаба 1:200000, растровая карта Крыма масштаба 1:100000, лесоустроительные схемы. Автоматическим способом были выделены водные объекты, застроенные территории, выходы скальных пород, вручную по снимкам и растровым картам выделялись сельскохозяйственные территории. Растительность выделялась по снимку, а породный состав определялся по схемам лесоустройства. В таблице 1 представлены выделенные классы типов землепользования для использования в расчетной модели.

Таблица 1  
Классы типов землепользования, выделенные для расчетной модели.

Код типа землепользования в SWAT	Тип землепользования
AGRR	Пашни
FRSD	Широколиственные леса
FRSE	Хвойные леса
GRAP	Виноградники
ORCD	Сады
PAST	Пастбища, территории не занятые в интенсивном сельском хозяйстве
RICE	Рисовые чеки
RNGB	Кустарники
UIDU	Не покрытые растительностью (карьеры и т.п.)
URHD	Населенные пункты с высокой плотностью населения
URLD	Населенные пункты с низкой плотностью населения
UTRN	Дороги, аэропорты и другие промышленные зоны
WATR	Водные поверхности

Характеристики типов землепользования уже заложены в SWAT, но модель, в зависимости от решаемых задач, позволяет проводить настройку этих данных. Например, для расчета урожайности сельскохозяйственных культур необходимо для исследуемых территорий ввести свои даты начала сева и сбора урожая, количество вносимых удобрений и гербицидов и т.д. Наличие этих данных значительно повышает точность модели.

**Почвы.** SWAT требует наличия данных о механических и физико-химических свойствах почв. Несмотря на большое количество почвенных исследований, которые проводились еще в СССР, не существует для Крыма единой информационной базы, подобной базе SSURGO (Soil Survey Geographic database), содержащей данные по 25 физическим и химическим характеристикам почв США [4]. Нами почвенная модель была создана на основе почвенной карты Крымской области масштаба 1:200000 [5] и классифицирована согласно FAO (FAO/UNESCO, 2003). На данном этапе исследований мы не можем оценить репрезентативность полученной почвенной модели. Но, несомненно, необходимо провести ее

уточнение, основываясь на литературные данные и данные существующих почвенных съемок.

**Данные о погоде и климате.** Климатические и метеорологические данные необходимые для запуска модели включают в себя значения осадков, влажности, максимальной и минимальной температуры, скорости ветра, значений солнечной радиации. Модель требует суточных значений этих параметров, которые могут быть получены напрямую из данных наблюдений метеопостов или сгенерированы на основании расчета таблицы состоящей из 14 среднеголетних ежемесячных климатических переменных [1]:

- Среднеголетний максимум температур для каждого месяца.
- Среднеголетний минимум температур для каждого месяца.
- Стандартное отклонение от максимума температуры воздуха для каждого месяца.
- Стандартное отклонение от минимума температуры воздуха для каждого месяца.
- Среднеголетние месячные значения осадков.
- Стандартное отклонение суточных значений осадков от среднемесячных для каждого месяца.
- Коэффициент асимметрии для суточных значений осадков для каждого месяца.
- Вероятность дождливого дня, следующего за сухим днем для каждого месяца.
- Вероятность дождливого дня, следующего за дождливым днем для каждого месяца.
- Среднее число дней с осадками для каждого месяца.
- Максимум осадков за 0,5 часа для каждого месяца.
- Среднесуточное значение солнечной радиации для каждого месяца.
- Среднее значение точки росы для каждого месяца.
- Средняя скорость ветра для каждого месяца.

В нашем распоряжении находились следующие климатические и метеорологические данные:

1. Среднеголетние ежемесячные значения осадков (134 метеопоста), влажности воздуха (43 метеопоста) температур (79 метеопостов), ветра (43 метеопоста) приведенных к длинному ряду 1900-1960 гг [6, 7, 8].

2. Средние дневные ежемесячные значения солнечной радиации по станциям – Евпатория, Карадаг, Никитский Сад, Клепинино, Черноморское, Симферополь, Феодосия, Ялта, Ай-Петри [9].

4. Агроклиматические показатели по 19 действующим метеостанциям за период 1986-2005 гг. [10].

5. Среднеголетние ежемесячные значения осадков (46 метеопостов), температур (24 метеопоста), обобщенные за период 1961-1990 гг. [11]

6. Суточные значения температур, осадков, влажности, скорости ветра по 22 метеостанциям за период 2006-2011 гг. Источником послужил сайт - <http://rp5.ua>,

который получает данные о фактической погоде с наземных метеорологических станций через систему свободного международного обмена метеоданными [12].

Перед нами стояли две задачи выбрать те климатические данные, по которым будет строиться модель, и найти пути интерполяции этих данных на всю территорию Крыма.

При наличии достаточно длинных рядов (рекомендуется не менее 20 лет) суточных данных было бы достаточно для получения всех 14 среднегодовых ежемесячных климатических переменных. Но в нашем распоряжении имеется только шестилетний ряд суточных метеоданных по 22 метеостанциям. Из-за малого временного периода этих данных и не уверенности в их точности (информация с сайта не является официальной, также в ходе ее анализ были выявлены ошибки, особенно в значениях осадков) целесообразней для получения среднемесячных значений использовать опубликованные данные справочников. Тем не менее, уточненные и исправленные суточные данные полезны для определения статистических величин, которых нет в справочниках, но которые необходимы для расчета модели. Например, таких как среднее число дней с осадками, вероятность дождя после сухого периода и т.д.

Сравнение некоторых климатических параметров, приведенных к разным временным рядам наблюдений, представлено в таблице 2.

Таблица 2

Среднегодовая температура воздуха и среднегодовые суммы осадков за разные временные периоды.

Метеостанции	Период наблюдений	Среднегодовая температура воздуха	Среднегодовые осадки
Симферополь	1900-1960	10,2	501
	1961-1990	10,6	505
	1986-2005	10,6	536
Ай-Петри	1900-1960	5,7	1052
	1961-1990	5,7	1086
	1986-2005	5,8	1041
Черноморское	1900-1960	10,5	312
	1961-1990	11	396
	1986-2005	11,2	363
Феодосия	1900-1960	11,7	376
	1961-1990	11,9	449
	1986-2005	12,1	512

Из таблицы видно значительное различие основных климатических параметров взятых из разных источников и относящиеся к разным временным периодом.

Подробный анализ изменения климатических характеристик за разные временные периоды проведен в [13]. Авторы также делают выводы об увеличении межгодовой изменчивости годовых величин температуры и атмосферных осадков. Эта изменчивость является причиной того, что результаты SWAT-модели могут значительно различаться в зависимости от того какие климатические данные использовались для ее построения.

Т.к. метеорологические величины измеряются только в дискретных точках, возникает проблема интерполяции этих величин на всю территорию Крыма. SWAT-модель для интерполяции данных использует метод ближайшего соседства (полигоны Тиссена). Это достаточно грубый подход, который может быть оправдан для территорий, где распределение тепла и влаги изменяется незначительно, или где существует сеть метеопостов с необходимой густотой и конфигурацией. Для Крыма мы не имеем ни того ни другого. Климатические зоны Крыма значительно отличаются между собой, а существующая сеть метеостанций не полностью отражает эти отличия.

Для решения подобного типа задач широко применяют различные методы пространственной интерполяции, позволяющие определить значения метеопараметров в заданных точках по их значениям, измеренным на ближайших метеопостах. Это такие методы как метод обратновзвешенных расстояний, метод полиномиальной аппроксимации, кригинг (кокригинг), метод оптимальной интерполяции.

Еще одним методом интерполяции климатических данных является метод множественной линейной регрессии (МЛР). Эффективность применения этого метода для интерполяции климатических данных хорошо продемонстрирована в литературе [9,13,14,15].

Общее уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$Y_i = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j * X_{ij} + \varepsilon_i \quad \text{для } i=1 \dots n, \quad (1)$$

где  $Y_i$  – искомая зависимая переменная,  $n$  – объем выборки,  $k$  – число независимых переменных,  $X_{ij}$  – совокупность независимых переменных, определяющих факторы воздействия на исследуемый объект,  $b_j$  – искомые коэффициенты множественной регрессии,  $\varepsilon_i$  – погрешность.

Но при решении задач пространственного моделирования данный метод часто не может быть применен из-за естественной пространственной коррелированности искомых переменных, т.е. когда в целом значения наблюдений в соседних регионах являются подобными. Для учета пространственной нестационарности была разработана географически взвешенная регрессия (ГВР), которая является подвидом множественной регрессии [16]. Географически взвешенная регрессия предполагает, что регрессионные коэффициенты могут изменяться в пространстве, т.е. в результате моделирования мы получаем множество локальных уравнений линейной регрессии, описывающих каждый элемент пространства. Уравнение географически взвешенной регрессии представлено ниже:

$$Y_i(u_i, v_i) = b_0(u_i, v_i) + \sum_j^k b_j(u_i, v_i) * X_{ij}(u_i, v_i) + \varepsilon_i(u_i, v_i) \quad \text{для } i=1 \dots n, \quad (2)$$

где  $(u_i, v_i)$  – параметры, характеризующие местоположение.

Примеры использования метода географически взвешенной регрессии можно увидеть в [17, 18].

Методы множественной линейной регрессии и географически взвешенной регрессии реализованы в программном пакете ArcGis 10. С помощью этого пакета нами были построены регрессионные модели для нахождения распределения среднемноголетних ежемесячных сумм осадков, максимальной и минимальной температуры, скорости ветра. Расчеты проводились отдельно для временных периодов 1900-1960 гг. , 1961-1990 гг. и 1986-2005 гг.

Общий алгоритм данного этапа моделирования выглядит следующим образом:

1. На ЦМР Крыма по известным координатам были нанесены метеостанции, метео- и гидропосты. Их местоположение уточнялось и корректировалось по топографической карте.

2. По литературным источникам были выявлены факторы, которые могут оказывать влияние на искомые климатические параметры.

3. Выявленные факторы были вычислены для каждой станции, используя инструменты пространственного анализа ArcGis 10.

4. Построена множественная линейная регрессионная модель. Выявлены значимые факторы. Проведена оценка качества полученной модели, остатки модели (разности между измеренными и вычисленными значениями) проверены на возможную пространственную корреляцию при помощи расчета коэффициента Морана.

5. Построена регулярная сетка точек 2 на 2 км. Для каждой точки вычислены выявленные факторы.

6. Для точек регулярной сетки построена географически взвешенная регрессионная модель. Проведена оценка ее качества.

7. По сетке 2 на 2 км построены карты распределения вычисленных климатических параметров на территорию Крыма.

8. Проведено сравнение полученных карт между собой и с опубликованными климатическими картами.

Ниже более подробно дается описание результатов выполнения данного алгоритма для нахождения сумм осадков и максимальной и минимальной температур.

**Осадки.** Метод множественной линейной регрессии был использован Боковым В.А. [9, 13] для нахождения поля осадков в горном Крыму. Расчет проводился отдельно для теплого и холодного периода. В качестве зависимых переменных использовались:

- высота метеопункта над уровнем моря,
- расстояние от точки до осевой части главной гряды Крымских гор,
- относительная высота (разность между высотой пункта над уровнем моря и средней высотой участка в радиусе 12 км),

- оценка склонового поднятия рельефа по направлению господствующего переноса влаги с запада на восток.

Расчеты показали, что высота является основным фактором, влияющим на количество осадков. Влияние остальных факторов незначительно.

Мы использовали все перечисленные выше факторы в наших расчетах. Но только для периода 1900-1960 гг. все факторы оказались значимыми, для остальных периодов значимым фактором осталась только высота. Скорее всего, это связано с меньшим количеством точек, которые использовались в расчетах для периодов 1961-1990 гг. и 1986-2005 гг., что не дало учесть менее значимые факторы, влияющие на количество осадков.

В таблице 3 даются некоторые результаты расчетов.  $R^2$  - коэффициент детерминации (объясняет качество модели, чем ближе значение  $R^2$  к 1, тем сильнее качество), AICc - относительная величина, которая позволяет сравнить разные регрессионные модели. Если значение AICc для двух моделей отличаются больше чем на 3, лучшей считается модель с меньшим значением AICc. Moran's I - тест на пространственную автокорреляцию. Статистически значимое отличие Moran's I от нуля говорит об автокоррелированности остатков регрессии.

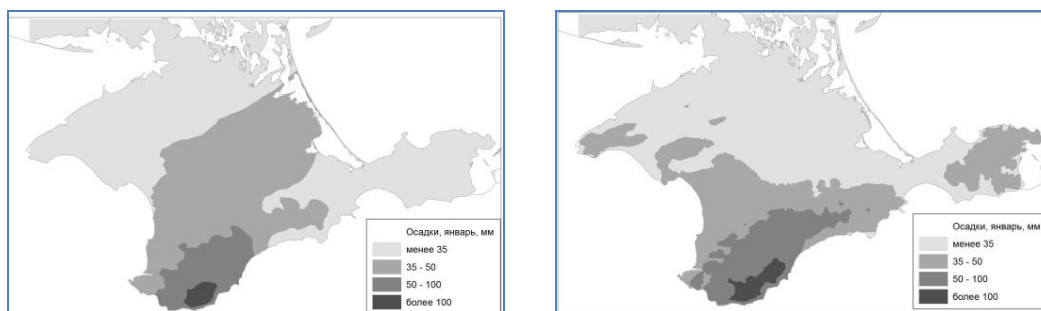
Таблица 3

Сравнение результатов регрессионного анализа.

Период	Месяц	Кол-во постов	МЛР			ГВР		
			$R^2$	AICc	Moran's I	$R^2$	AICc	Moran's I
1900-1960	январь	134	0,63	1052	0,18	0,86	991	0,009
	июль		0,6	1050	0,14	0,74	1042	0,008
1961-1990	январь	46	0,62	390	0,21	0,93	320	0,008
	июль		0,54	339	0,12	0,65	327	0,002
1986-2005	январь	19	0,69	158	0,48	0,75	149	0,05
	июль		0,50	141	0,11	0,56	137	0,08

В целом географически взвешенная модель показывает лучшие результаты расчетов. Также можно отметить, что в летние месяцы качество моделей ухудшается, что связано с тем, что в летний период существенную роль играют и внутримассовые конвективные осадки [9].

По результатам географически взвешенной регрессии были построены карты распределение полей осадков. На рисунке 1 показано распределение атмосферных осадков января за периоды 1900-1960 гг. и 1961-1990 гг.



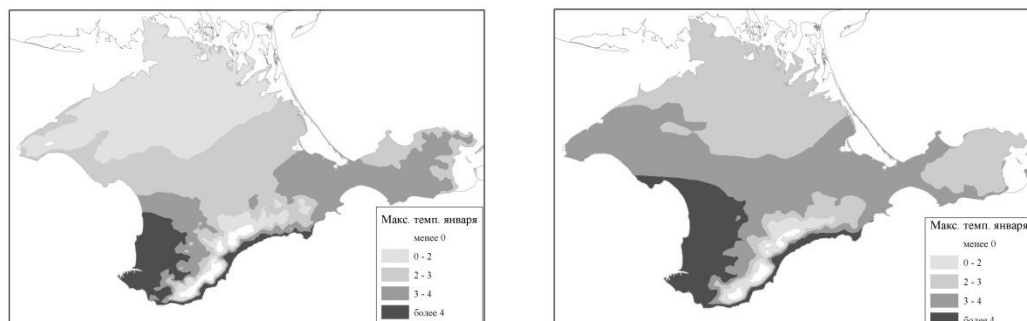
а) период 1900-1960 гг

б) период 1961-1990 гг

Рис. 1. Сравнение распределения атмосферных осадков января за разные временные периоды.

Мы видим существенное отличие в распределении осадков января за сравниваемые периоды. Такое же отличие наблюдается и в распределении осадков за другие месяцы. Очевидно, что в зависимости от того какие данные будут выбраны для ввода в SWAT-модель, результаты моделирования будут отличаться.

**Температура.** По аналогичному алгоритму строились регрессионные модели для максимальной и минимальной температуре. Зависимыми переменными для температуры являлась высота пункта над уровнем моря. Как и в случае с осадками географически взвешенная модель показала лучшие результаты. Она объяснила от 74% летом до 96% зимой вариации значения. Также отмечается отличие результатов, полученных по данным разных временных периодов (рис. 2).



а) период 1900-1960 гг

б) период 1961-1990 гг

Рис. 2. Сравнение распределения максимальной температуры января за разные временные периоды.



## ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных исследований был выработан алгоритм, который дает возможность подготовить данные, необходимые для запуска SWAT-модели. Очевидно, что качество результатов SWAT моделирования зависит от качества входящих данных. Но если при подготовке таких данных как рельеф, типы землепользования, почвы достаточно легко держать под контролем используемую информацию, то для метеоданных это не всегда очевидно. В зависимости от того какие источники метеоданных используются и какие способы интерполяции выбраны можно получить различный рисунок пространственной дифференциации метеопараметров, что в свою очередь повлияет на конечные результаты SWAT моделирования.

## Список литературы

1. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation: Version 2009. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center: Temple. [Электронный ресурс] / Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, Williams JR. – Режим доступа <http://swatmodel.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf>
2. Лычак А.И. Прогнозное моделирование геоэкологических ситуаций в Крыму с использованием SWAT-модели / Лычак А.И., Бобра Т.В., Яшенков В.О.// Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского Серия «География». Том 24 (63). 2011 г. №2, часть 3. С. 116-121.
3. Карионов Ю. И. Оценка точности матрицы SRTM / Ю. И. Карионов // Геопрофи. – 2010. – № 1. – С. 48–51.
4. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (NRCS). January 1995. Soil Survey Geographic (SSURGO) Database: Data Use Information. [Электронный ресурс] - <http://www.mass.gov/mgis/ssurgodb.pdf>
5. Грунти Кримської області : на підставі матеріалів обслідувань ґрунтів 1957-61 рр. / Склад ін-том "Укрземпроект" та Укр. НДІ ґрунтознавства ім. О.Н.Соколовського в 1966 р. - К. : Б. вид-ва, 1967. - 1 к. (6 арк.) : кольор. ; 56x59 см.
6. Справочник по климату СССР, вып.10, Украинская ССР, ч.IV, Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. - Л. Гидрометеоиздат, 1969 – 696 с.
7. Справочник по климату СССР, вып.10, Украинская ССР, ч.II, Температура воздуха и почвы, - Л.:Гидрометеоиздат, 1967 – 607 с.
8. Справочник по климату СССР, вып.10, Украинская ССР, ч.II, Ветер, -Л.:Гидрометеоиздат, 1967 – 696 с.
9. Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / [под ред. д.г.н., проф. В.А. Бокова]. – Симферополь: ДОЛЯ, 2010. – 304 с.
10. Агрокліматичний довідник по Автономній Республіці Крим (1986-2005 рр.) : довідник / [ред.: О. І. Прудко, Т. І. Адаменко]. - Симферополь : Таврида, 2011. - 343 с
11. Кліматичний Кадастр України (електронна версія) / Державна гідрометеорологічна служба УкрНДГМІ. Центральна Геофізична Обсерваторія. – К. – 2006.
12. Расписание погоды. Погода в Автономной Республике Крым [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rp5.ua/map/113/0/ru> (дата обращения: 12.04.2012).
13. Mapping monthly precipitation, temperature, and solar radiation for Ireland with polynomial regression and a digital elevation model, Climate Research [Электронный ресурс] / Goodale, C. L., J. D. Aber, and S.V. Ollinger –1998 – №10 – С. 35–49. – Режим доступа: <http://www.int-res.com/articles/cr/10/c010p035.pdf>

14. Spatial Modeling of Climate, Faculty of Civil Engineering, Department of Mapping and Cartography, The Czech Technical University in Prague : (Master Thesis) [Электронный ресурс]. – Müller A. – 2010 – 102 p. – Режим доступа: <http://maps.fsv.cvut.cz/~muller/AM-DP.pdf>
15. Spatio-Temporal Analyses of Precipitation and Temperature Distribution over Turkey : (14th International Symposium on Spatial Data Handling) [Электронный ресурс] / Pınar Aslantaş Bostan, Zuhul Akyürek // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2007 – Vol. 38, Part II – P.231-249. – Режим доступа: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part2/Papers/29\\_Paper.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part2/Papers/29_Paper.pdf)
16. Geographically Weighted Regression. White Paper [Электронный ресурс] / Marin Charlton, A. Stewart Fotheringham. – 2009 – 14 pp. – Режим доступа: [http://ncg.nuim.ie/ncg/GWR/GWR\\_WhitePaper.pdf](http://ncg.nuim.ie/ncg/GWR/GWR_WhitePaper.pdf)
17. Application of Geographically Weighted Regression to Investigate the Impact of Scale on Prediction Uncertainty by Modelling Relationship between Vegetation and Climate [Электронный ресурс] / Pavel Propastin, Martin Kappas, Stefan Erasmí // International Journal of Spatial Data Infrastructures Research – 2008. – Vol. 3. – P.73-94 – Режим доступа: <http://ijsdir.jrc.ec.europa.eu/index.php/ijsdir/article/viewFile/89/94>
18. The Use of Geographically Weighted Regression for the Relationship among Extreme Climate Indices in China [Электронный ресурс] / Chunhong Wang, Jianshe Zhang, Xiaodong Yan – 2011 – 15 pp. – Режим доступа: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/369539/>.

**Глушенко І.В. Методичні проблеми підготовки даних для побудови SWAT-моделі на територію Крима / Глушенко І.В. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Географія. – 2012. – Т.25 (64). – № 1 – С. 38-47.**

В статті дана оцінка репрезентативності даних, необхідних для запуску swat-моделі, показані дороги заповнення розривів між доступними даними і даними необхідними для побудови SWAT-моделі на територію Криму.

**Ключові слова:** SWAT, геоінформаційне моделювання, інтерполяція, кліматичні дані.

**Glushchenko I. Methodical problems in preparing data for the SWAT model construction for territory of the Crimea / Glushchenko I.V. // Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. – Series: Geography. – 2012. – Vol. 25 (64). – № 1 – P. 38-47.**

Estimation of the representativeness of data necessary to start of the SWAT-model is given in the article. The ways of filling of gap between available data and information necessary for the construction of the swat-model for territory of the Crimea are described.

**Keywords:** SWAT, GIS modeling, interpolation, climate data.

*Поступила в редакцію 16.05.2012 г.*